



Interconnexion des réseaux logistiques : éléments de définition et potentiel

Rochdi Sarraj

► To cite this version:

Rochdi Sarraj. Interconnexion des réseaux logistiques : éléments de définition et potentiel. Economies et finances. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2013. Français. NNT : 2013ENMP0009 . pastel-00871048

HAL Id: pastel-00871048

<https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00871048>

Submitted on 8 Oct 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

École doctorale n° 396 : Economie, Organisations & Société

Doctorat ParisTech

T H È S E

pour obtenir le grade de docteur délivré par

l'École nationale supérieure des mines de Paris

Spécialité “ Sciences de Gestion ”

présentée et soutenue publiquement par

Rochdi SARRAJ

le 07 juin 2013

INTERCONNEXION DES RESEAUX LOGISTIQUES : ELEMENTS DE DEFINITION ET POTENTIEL

Directeur de thèse : **Eric BALLOT**

Co-encadrement de la thèse : **Frédéric FONTANE**

Co-encadrement de la thèse : **Shenle PAN**

Jury

M. Pierre DEJAX, Professeur, IRCCyN, Ecole des Mines de Nantes

M. Damien TRENTESAUX, Professeur, TEMPO, Université de Valenciennes

Mme. Caroline THIERRY, Professeur, IRIT, Université Toulouse 2 Le Mirail

M. Benoit MONTREUIL, Professeur, CIRRELT, Université Laval

M. Eric BALLOT, Professeur, CGS, MINES ParisTech

M. Frédéric FONTANE, Maître-assistant, CAOR, MINES ParisTech

M. Shenle PAN, Docteur-Ingénieur, CGS, MINES ParisTech

Rapporteur
Rapporteur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur
Examineur

**T
H
È
S
E**

MINES ParisTech

Centre de Gestion Scientifique

60, Boulevard Saint-Michel 75272 PARIS cedex 06

REMERCIEMENTS

Je tiens à adresser en premier lieu mes plus chaleureux remerciements à mon directeur de thèse M. Eric Ballot. Il n'a pas simplement dirigé ma thèse, il m'a aussi transmis la passion de la recherche, du travail accompli, tout en créant une atmosphère de travail à la fois très agréable et très dynamique. Cette expérience de la thèse restera longtemps gravée dans ma mémoire et le travail réalisé lui doit beaucoup. Je tiens à lui faire part de mon plus profond respect et de toute mon admiration.

Je remercie également M. Shenle Pan non seulement pour son encadrement mais aussi pour l'ensemble des journées passées à discuter de nos travaux de recherche. Shenle est beaucoup plus qu'un simple encadrant, il m'a toujours soutenu pendant les moments difficiles et mis la pression lors des moments de relâchement. Sa rigueur et sa motivation restent pour moi des sources d'inspiration.

Je tiens aussi à remercier M. Frédéric Fontane, pour son soutien, ses conseils pendant ces trois années de thèse et particulièrement pour son aide lors de la relecture de ce mémoire et la préparation de la soutenance.

J'adresse aussi mes profonds remerciements aux rapporteurs de cette thèse M. Pierre Dejax (Professeur à l'Ecole des Mines de Nantes) et M. Damien Trentesaux (Professeur à l'Université de Valenciennes), ainsi qu'aux examinateurs Mme. Caroline Thierry (Professeur à l'Université Toulouse 2 Le Mirail), et M. Benoit Montreuil (Professeur à l'Université de Laval). Je suis très sensible à l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de participer à ce jury de thèse.

Je remercie le PREDIT et plus particulièrement notre interlocuteur M. Michel Julien pour la confiance et l'intérêt qu'il a accordé à ce projet de recherche.

Je remercie également M. Franck Aggeri (directeur du CGS) et Mme Blanche Segrestin (Responsable de la formation Doctorale), leur soutien m'a permis d'assurer plusieurs cours et d'enrichir ainsi mon expérience d'enseignant.

Je tiens à remercier mes compagnons de bureau, mes amis Frédéric et Elsa, pour l'ensemble des moments que l'on a passé ensemble. Je tiens vraiment à ce qu'ils sachent que je les apprécie tout particulièrement. Je remercie également Xiaozhou dont la générosité et la bonté font de lui quelqu'un d'exceptionnel.

Je transmets aussi mes remerciements à Akin, Cédric, Elvira, Frédéric A., Habib, Jeanne, Kenza, Kevin, Lucie, Maud, Olga K., Olga. L, Paris, Pierre-Antoine, Rébecca, Sébastien, Sophie, Stéphanie, Sylvain, et tous ceux que j'ai pu connaître pendant ces trois années aux Mines ParisTech. Je les remercie pour nos diverses et chaleureuses discussions et pour les agréables moments que l'on a pu partager. Je remercie également Céline et Martine pour leurs aides si précieuses, et pour leur disponibilité.

Je tiens à remercier Driss Hakimi (Université Laval, CIRRELT) pour toute son aide. Ses critiques et ses suggestions m'ont permis d'améliorer mon travail.

Enfin, je souhaite remercier ma famille et ma belle-famille pour leur soutien constant.

L'aboutissement de cette thèse, je le dois beaucoup à mes parents et à ma femme. Mes parents qui m'ont toujours soutenu et qui m'apportent depuis mon plus jeune âge tout l'amour et l'affection dont j'ai besoin, et ma femme exceptionnelle qui s'est montrée très patiente et avec qui j'ai vécu dans un climat serein, à l'abri de tous soucis affectifs. Il m'est impossible de trouver des mots pour dire à quel point je les aime... Je tiens aussi à remercier mes frères Achraf, Mehdi et Seif. Je suis profondément touché par leur complicité, l'affection sans réserve qu'ils me portent, et je tiens à ce qu'ils sachent qu'ils comptent beaucoup pour moi.

Rochdi SARRAJ

A ma famille

SOMMAIRE

CHAPITRE 1.	INTRODUCTION	13
1.1	Le Contexte	14
1.2	Les objectifs du mémoire de thèse.....	14
1.3	Les étapes de la recherche.....	15
1.4	Organisation du mémoire de thèse.....	16
CHAPITRE 2.	L'INTERCONNEXION DES RESEAUX LOGISTIQUES COMME REPONSE A L'ANTAGONISME CROISSANT ENTRE PERFORMANCES ACTUELLES ET ATTENDUES	21
2.1	La logistique : définition et fonctionnements	22
2.1.1	Définition de la logistique.....	22
2.1.2	La logistique : un domaine en perpétuelle évolution	23
2.2	L'antagonisme entre les performances actuelles et celles attendues	29
2.2.1	Le transport de marchandises : Activité centrale dans la logistique.....	29
2.2.2	Performance du transport de marchandises : Ce système est-il soutenable ?	35
2.3	Solutions face à cet antagonisme	40
2.3.1	Amélioration du transport de marchandises : Méthodologies existantes	41
2.3.2	Amélioration du transport de marchandises : De nouveaux concepts.....	43
2.3.3	L'Interconnexion des réseaux de prestation logistiques.....	44
2.4	Terrain d'étude : la grande distribution.....	50
2.5	Conclusion	54
CHAPITRE 3.	LES DIMENSIONS PHYSIQUES ET ORGANISATIONNELLES DE L'INTERCONNEXION DES RESEAUX LOGISTIQUES.....	59
3.1	Caractéristiques physiques et organisationnelles des réseaux à interconnecter	60
3.1.1	Réseaux logistiques : Une hétérogénéité à plusieurs niveaux	60
3.1.2	Un socle en commun nécessaire pour interconnecter les réseaux logistiques terrestres	69
3.2	Concepts et problématiques physiques et organisationnelles associées à l'interconnexion des réseaux logistiques.....	72
3.2.1	Le parallèle entre l'informatique et la logistique	72
3.2.2	Problématiques associées à l'interconnexion des réseaux informatiques.....	74

3.2.3	L'interconnexion des réseaux logistiques : Eléments clefs	76
3.3	La conteneurisation	78
3.3.1	L'intérêt de la conteneurisation.....	78
3.3.2	La conteneurisation : Un concept déjà développé dans le transport maritime	80
3.3.3	Les conteneurs de l'Internet Physique	81
3.4	Topologie du réseau formé par les réseaux interconnectés.....	83
3.4.1	Connexion entre réseaux et transit des flux.....	83
3.4.2	Topologie du réseau des réseaux.....	90
3.5	Echange de flux entre opérateurs.....	96
3.5.1	Les échanges de flux d'informations entre opérateurs de l'Internet	96
3.5.2	Les échanges de flux d'informations au sein d'un opérateur de l'Internet.....	97
3.5.3	Les échanges de flux dans Internet Physique	98
3.6	Le Routage : détermination du meilleur chemin dans un réseau	100
3.7	Conclusion	101
CHAPITRE 4.	ROUTAGE DES CONTENEURS DANS UN RESEAU INTERCONNECTE	105
4.1	Le routage dans Internet.....	105
4.1.1	Classification des algorithmes de routage et Positionnement du routage des paquets de données ..	105
4.1.2	Algorithmes de détermination de la route dans le réseau de l'Internet	108
4.2	Le routage dans l'Internet Physique	113
4.2.1	Exigences du transport de marchandises vis-à-vis des algorithmes de routage	114
4.2.2	Classification des algorithmes de routage et positionnement du routage dans Internet Physique....	114
4.2.3	Algorithmes de détermination de la route d'un conteneur dans le réseau de l'Internet Physique	119
4.3	Conclusion	133
CHAPITRE 5.	PROPOSITIONS DE PROTOCOLES POUR TRANSPORTER DES CONTENEURS DANS DES RESEAUX DE DISTRIBUTION INTERCONNECTES	139
5.1	Hypothèses pour la simulation	141
5.2	Conteneurisation des marchandises.....	143
5.2.1	Définition des conteneurs.....	143
5.2.2	La conteneurisation	146
5.2.3	Implémentation dans le simulateur	147
5.2.4	Améliorations possibles du protocole de conteneurisation	150

5.3 Acheminement des flux physiques	151
5.3.1 Objectifs de l'acheminement dans l'Internet Physique	151
5.3.2 Un algorithme de routage (d'acheminement) des conteneurs: le meilleur chemin	152
5.3.3 Implémentation dans le simulateur	154
5.3.4 Améliorations possibles du protocole de routage.....	155
5.4 Groupage des conteneurs et affectation aux moyens de transport.....	156
5.4.1 Protocoles de groupage et d'affectation aux moyens de transport	157
5.4.2 Le problème du Bin-Packing	159
5.4.3 Implémentation dans le simulateur	161
5.4.4 Améliorations possibles du protocole de groupage et d'affectation aux moyens de transport.....	164
5.5 Conclusion	166
 CHAPITRE 6. POTENTIEL D'UN RESEAU INTERCONNECTE	 169
6.1 Modèle de simulation et méthodologie.....	170
6.2 Les flux de marchandises considérés	172
6.2.1 Les flux	173
6.2.2 Réseaux d'approvisionnements actuels	174
6.3 La logistique actuelle : réseaux et modélisation	176
6.3.1 Modélisation de la logistique actuelle	177
6.3.2 Données de l'infrastructure actuelle.....	178
6.4 L'Internet Physique : Réseaux et protocoles.....	180
6.4.1 Réseau Internet Physique – usines / entrepôts / DC	182
6.4.2 Réseau Internet Physique liant directement les usines aux centres de distribution	183
6.5 Evaluation des performances de l'interconnexion des réseaux logistiques	185
6.5.1 Indices de performances mesurées.....	185
6.5.2 Les scénarios simulés.....	188
6.5.3 Résultats obtenus	191
6.6 Conclusion	214
6.6.1 Des premiers résultats qui montrent des gains significatifs	215
6.6.2 Malgré les limites de cette première simulation.....	216
6.6.3 Les nouvelles perspectives pour la simulation	216
 CHAPITRE 7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	 221
7.1 Les apports de ce travail de recherche.....	221

7.2	Les limites principales	223
7.2.1	Limites des protocoles proposés pour l'Internet Physique	223
7.2.2	Limites du modèle de simulation	224
7.2.3	Limites de l'évaluation des coûts	225
7.3	Les perspectives de recherche : la concrétisation	225
7.3.1	L'adhésion des parties prenantes au concept de l'Internet Physique	225
7.3.2	La mise en œuvre technologique	226
7.3.3	La mise en œuvre organisationnelle	227
REFERENCES		229
CHAPITRE 8. ANNEXES		237
Annexe 1: Réseau ferroviaire considéré		237
Annexe 2 : Valeurs par défaut des paramétrages de la simulation		239
Annexe 3 : Exemple de résultats de la simulation		244

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Flux de marchandises entre deux producteurs et des points de vente via une plateforme distributeur (Pimor 2001).....	25
Figure 2: Système logistique simple d'après (Mentzer et al. 2001) : une unique organisation commerciale pour gérer les flux depuis les fournisseurs jusqu'aux clients	26
Figure 3: Système logistique complexe d'après (Mentzer et al. 2001) : Multiples organisations commerciales intermédiaires entre fournisseurs et clients.	26
Figure 4: Supply Chain Process d'après (Min et al. 2002)	27
Figure 5: Structure du Supply Network (Lambert et al. 2000)	28
Figure 6: Évolution de la répartition des coûts logistiques (ASLOG 2006)	30
Figure 7: Transport intérieur de marchandises par mode en France, en tonnes-km (SOeS, Compte des Transports).....	30
Figure 8: Transports intérieurs terrestres des marchandises par mode en France (Source INSEE, SOeS, Compte des Transports)	35
Figure 9: Croissances comparées des flux de marchandises en France, de leurs émissions et de l'objectif européen pour 2050	37
Figure 10: Superposition des flux dans les chaînes d'approvisionnement actuelles (exemple de la grande distribution en France) (Sarraj et al. 2012b).....	38
Figure 11: Axes de recherches pour la réduction des émissions enCO ₂ liées au fret la (Commission Européenne 1998).....	40
Figure 12: Superposition des flux dans les chaînes d'approvisionnement actuelles vs. un réseau de plates-formes en fonction dans une logique d'interconnexion.....	45
Figure 13: European Green Cars Initiative - road-map et stratégie à long terme (Initiative 2010).....	46
Figure 14: Un réseau de prestations logistiques indépendantes et superposées (n fois) à gauche, par opposition à un unique réseau interconnecté à droite (Sarraj et al. 2012b).	47
Figure 15: Réseaux qui se chevauchent vs réseau interconnecté	49
Figure 16: Exemple de réparation des nœuds logistiques dans la grande distribution (site logistique routier en jaune, multimodal en gris, centre de distribution en vert, entrepôt en bleu, usine en rouge)	51
Figure 17: Répartition des magasins U (à gauche) et Aldi (à droite).....	52

Figure 18: Organisation du secteur de la grande distribution	53
Figure 19: Exemple de structure de flux entre acteurs de la chaîne logistique	60
Figure 20: Parcours de la marchandise depuis l'usine au consommateur final.....	61
Figure 21: Des topologies différentes pour les réseaux logistiques	61
Figure 22: Exemple simple d'un réseau logistique du point de vue d'un distributeur (Grande distribution)	62
Figure 23: Exemples d'hétérogénéité du parc ferroviaire - wagon E71 VS R20 (Source : SNCF).....	63
Figure 24: Un conteneur de 8 pieds ne suffit pas pour charger 2 palettes (800 x 1 200 mm) dans le sens de longueur, ni pour charger 3 palettes dans le sens de la largeur	66
Figure 25: Meilleur chargement possible de conteneurs maritimes par rapport aux dimensions d'une semi-remorque Européenne (dimensions utiles intérieures pour la semi-remorque et dimensions extérieurs pour les conteneurs)	67
Figure 26: Evolution de la flotte européenne de caisses mobiles	68
Figure 27: Flux de marchandises du réseau logistique présenté dans la Figure 22	70
Figure 28: Exemple de deux prestations de produits d'épicerie pour la grande distribution exécutées indépendamment bien que touchant des clients communs - 1 ^{er} réseau à gauche et 2 nd à droite (Ballot et al. 2010)	71
Figure 29: Superposition d'un ensemble de prestations (non exhaustif) de produits d'épicerie pour la grande distribution (Ballot et al. 2010)	72
Figure 30: Conteneurs modulaires pour l'Internet Physique (Ballot et al. 2012b).....	80
Figure 31: Connexions de réseaux via des routeurs	84
Figure 32: Datagramme IP	84
Figure 33: Fonctionnement du routage; 1,2,3 et 4 sont des routeurs	85
Figure 34: Table de routage.....	85
Figure 35: Exemple de trame dans TCP/IP	86
Figure 36: Trame encapsulant des paquets de données (cas général)	86
Figure 37: Schématisation conceptuelle de l'Internet, réseau d'interconnexion de SA.....	91
Figure 38 : Schématisation conceptuelle de l'Internet, réseau d'interconnexion de SA. Les chiffres correspondent à des niveaux de hiérarchie.....	92
Figure 39: Schématisation hiérarchique du réseau Internet sous forme de 3 niveaux (LAN = réseau local).....	92

Figure 40: Internet Physique avec une vision géographique des SA (figure à droite), Internet Physique avec une vision purement conceptuelle des SA (figure à gauche). Les échanges de flux entre SA dans ce second cas se font aussi dans les zones d'intersection des SA.	95
Figure 41: Positionnement du routage de l'Internet dans les classifications générales des types de routages.....	108
Figure 42: Graphe représentant un réseau de l'Internet; A étant des routeurs	109
Figure 43: SA de niveau 2 interconnectant des SA de niveaux 1	128
Figure 44: Communication entre deux SA - étape 1	129
Figure 45: Communication entre deux SA - étape 2	130
Figure 46: Communication entre deux SA - étape 3	130
Figure 47: Schéma de principe des protocoles routage dans le cadre d'une expédition	140
Figure 48: Aperçu du processus de création des conteneurs implémenté dans le simulateur	149
Figure 49: Aperçu du processus d'acheminement des conteneurs implémenté dans le simulateur	155
Figure 50: Fonction du passage par un hub multimodal (couleur = origine, trait = destination)	157
Figure 51: Aperçu du processus degroupage des conteneurs et d'affectation au moyens de transport implémenté dans le simulateur	164
Figure 52: Interfaces du simulateur	170
Figure 53: Processus de la simulation	171
Figure 54: Flux et schémas logistiques actuels	173
Figure 55: Localisation des sites de la base de données	176
Figure 56: Réseau des usines, entrepôts et centres de distribution reliés par les schémas logistiques routiers	179
Figure 57: Sites multimodaux pris en compte dans les scénarios utilisant le réseau ferroviaire par filtrage de la base de l'IGN	180
Figure 58: Exemple de passage d'un réseau de prestations dédiées (à gauche) à un réseau interconnecté (à droite)	182
Figure 59: Réseau de schémas logistiques de l'Internet Physique reliant l'ensemble des sites	183
Figure 60: Réseau de schémas logistiques de l'Internet Physique reliant directement les usines aux centres de distribution	184
Figure 61: Un exemple de trafic généré sur l'infrastructure par le réseau PI	185

Figure 62: Modèle de Supply Chain Actuel	189
Figure 63: Scénario 1: Internet Physique avec uniquement le transport routier	189
Figure 64 : Scenarios 2: l'Internet physique avec le transport multi-modal) rail et route(...	190
Figure 65: Réseaux interconnectés, sc. 2.3.C - Vision du flux	190
Figure 66: Scénario 3: Flux directs entre usines et centres de distributions dans PI	191
Figure 67: Conteneurs créés par taille entre les scénarios – Hors échelle : Sc 1.1 avec 117 585 conteneurs de 12m de longueur, Sc1.2 avec 677 551 conteneurs de 1.2 m de longueur.	196
Figure 68: Taux de remplissage moyen en poids par scénario.....	197
Figure 69: Taux d'utilisation en volume des moyens de transport par variante des scénarios	199
Figure 70: Nombre moyen de passage par hubs-entrepôts par scénarios	200
Figure 71: Délai de livraison moyen des conteneurs (en heures) par scénarios	202
Figure 72: Exemple de flux hebdomadaire entre entrepôt et centre de distribution (flux sur 12 semaines).....	205
Figure 73: Autre exemple de flux hebdomadaire entre entrepôt et centre de distribution (flux sur 12 semaines).....	206
Figure 74: Exemple de variation d'un stock-usine dans les hypothèses du modèle.....	207
Figure 75: Répartition des coûts.....	208
Figure 76: Million de t.km par variante des scénarios (les t.km ferroviaires sont en orange)	209
Figure 77: Les émissions en CO2 par scénario (les émissions ferroviaires sont en bleu)	211
Figure 78: Variation des nuitées passées sur la route par jour par variante des scénarios	212
Figure 79: Variation des services de conduite en transport routier par variante des scénarios	213
Figure 80: Variation des services de conduite en transport ferroviaire par variante des scénarios	213
Figure 81: Liste des terminaux multimodaux utilisés	238
Figure 82 : Flux journaliers traités par les hubs routiers du Scénario 2.3.C	247
Figure 83 : Flux journaliers traités par les hubs multimodaux du Scénario 2.3.C	248
Tableau 1: Scénarios du besoin en transport de marchandises à l'horizon 2030 (Duong et al. 2008).....	33
Tableau 2: Estimation du transport de marchandises en France en 2030 (d'après (Duong et al. 2008).....	34

Tableau 3: Répartition de la production française selon les types de modèles 2005 – (Sétra 2008b).....	64
Tableau 4: Les palettes standards dans différentes régions du monde (AFNOR 2005).....	64
Tableau 5: Parallèles entre réseaux informatiques et logistiques.....	74
Tableau 6: Analogie entre réseau informatique et physique	88
Tableau 7: Analogie entre routeurs de l’Internet et PI-hub.....	90
Tableau 8: Analogies entre Internet et Internet Physique	94
Tableau 9: Eléments d’analogie entre Internet et Internet Physique.....	98
Tableau 10: Exemple de base de données d’un routeur	111
Tableau 11: Trafic moyen journalier en unités de poids lourds (véhicules classes 3 et 4) - INSEE.....	116
Tableau 12: Représentation en graphe d'un réseau logistique: Signification des nœuds et des arcs	117
Tableau 13: Exemple de base de données de routage dans un nœud du réseau PI	122
Tableau 14: Modèle de base de données de routage pour un nœud du réseau Internet Physique	124
Tableau 15: Comparaison de conteneurs pour une longueur standard de 20pieds (dimensions intérieures).....	145
Tableau 16: Jeux de conteneurs	147
Tableau 17: Description des flux actuels	174
Tableau 18: Liste des indicateurs de performance retenus.....	187
Tableau 19: Présentation des scénarios	188
Tableau 20: KPIs des scenarios simulés	194
Tableau 21: Les stocks modélisés dans les usines et entrepôts selon les scénarios.	204
Tableau 22: Paramétrages par défaut du modèle et de sa valorisation.....	240
Tableau 23: Aperçu des résultats obtenus à la suite de la simulation du scénario 2.3.C	245
Tableau 24: Coûts d’immobilisation et de possessions des stocks de cycle et de sécurité - Sc 2.3.C	247

Chapitre 1 : Introduction

1.1	Le Contexte	14
1.2	Les objectifs du mémoire de thèse.....	14
1.3	Les étapes de la recherche.....	15
1.4	Organisation du mémoire de thèse.....	16

Chapitre 1. Introduction

De nos jours, l'offre logistique a atteint, dans les pays développés, un niveau de service jamais atteint. Les exemples en la matière dans les activités économiques actuelles ne manquent pas. Ainsi, il est possible pour un consommateur final de se faire livrer à un créneau horaire précis de la journée dans un délai court après avoir commandé un bien sur un site marchand. Dans un autre registre, la livraison bord de chaîne dans une usine terminale automobile s'opère pour une partie des pièces en approvisionnement synchrone, laissant une fenêtre de réquisition de deux heures au fournisseur ! La logistique est devenue au fil du temps un producteur de service qui contribue de façon importante au développement de nos économies.

Plusieurs facteurs expliquent cet essor de la logistique et du transport de marchandises : les innovations technologiques dans les moyens de transport et de stockage, les accords commerciaux au niveau de l'OMC, l'émergence de prestataires logistiques mondiaux, la disponibilité des ressources naturelles et particulièrement énergétiques.

Néanmoins, les performances des organisations logistiques actuelles deviennent de moins en moins compatibles avec les préoccupations environnementales. En effet, le transport de marchandises, qui reflète l'intensité des activités logistiques, a connu ces dernières années une forte croissance en termes de volume et malgré la crise des économies occidentales, il affiche des perspectives à la hausse. Si cette tendance se confirme, elle se traduirait, sans changements radicaux dans la structure des systèmes logistiques, par une augmentation significative des émissions de CO₂. Une position difficilement tenable au regard des exigences de développement durable énoncées par l'Europe, concernant les émissions de gaz à effet de serre (GES). En effet, l'objectif est de réduire les émissions de GES de 20% en 2020, et de les diminuer d'un facteur 4 en 2050 (Boissieu 2006).

La logistique et en particulier le transport de marchandises doit donc faire face à deux tendances contradictoires, avec, d'une part, une volonté de réduire les émissions de GES, et, d'autre part, satisfaire un besoin croissant en matière de transport. Cette thèse cherche à montrer qu'une interconnexion universelle des réseaux de prestations logistiques, qui sont actuellement dédiés et fragmentés, peut être une solution viable pour répondre à ces attentes antagonistes. Des éléments clefs nécessaires pour la mise en œuvre de ce type d'interconnexion seront également proposés.

1.1 Le Contexte

Afin de répondre à de tels objectifs en matière de transport durable, ce travail doctoral fait l'hypothèse qu'une meilleure utilisation des moyens logistiques (camion, train, entrepôt, plateforme, etc.), contribuera à obtenir des économies énergétiques et à présenter un meilleur bilan environnemental.

De manière implicite, on postule que l'organisation actuelle des réseaux logistiques qui est bien souvent dédiée conduit à une sous-utilisation des capacités logistiques disponibles. C'est pourquoi, cette thèse propose de tester la pertinence d'interconnecter les réseaux de prestations logistiques, pour conduire à la constitution d'un réseau de réseaux, ouvert et dans lequel l'ensemble des moyens pourrait être partagé, mieux utilisé et ainsi permettre une meilleure consolidation des flux logistiques..

Cette recherche s'inscrit dans le cadre d'un projet réalisé pour le GO4 du PREDIT et financé par la direction de la recherche du Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer en charge des Technologies vertes et des Négociations sur le climat (Ballot et al. 2012b). A ce titre, un certain nombre d'apports présentés dans ce mémoire de thèse a aussi fait l'objet du rapport réalisé pour le PREDIT.

Ce travail de recherche a fait l'objet d'une publication dans *Journal of Intelligent Manufacturing* (Sarraj et al. 2012b) et d'une soumission à *International Journal of Production Research* (Sarraj et al. 2013). Par ailleurs, il a fait l'objet de plusieurs communications dans des conférences internationales (*Congrès du Génie Industriel 2011* (Sarraj et al. 2011), *International Conference of Logistics Research 2012* (Sarraj et al. 2012a)). Afin de tester cette approche originale, nous avons choisi de l'appliquer au cas des produits de grande consommation (DPH, Liquide et Epicerie) et aux acteurs (grands distributeurs et industriels) qui composent les chaînes logistiques assurant la disponibilité de ces produits dans les linéaires des points de ventes en France.

1.2 Les objectifs du mémoire de thèse

L'intérêt de cette recherche réside, d'une part, à définir les dimensions physiques et organisationnelles qui permettraient d'interconnecter les réseaux logistiques, créant ainsi un nouveau réseau ouvert, et, d'autre part à mesurer précisément les gains résultants de cette nouvelle structure logistique. Ainsi, les deux grands objectifs de cette recherche sont :

- Elaborer les principes qui vont permettre d'opérer le passage d'un ensemble de réseaux de prestations logistiques dédiées à un réseau de réseaux ouverts. Ce premier objectif nécessite notamment d'identifier les modalités nécessaires pour réaliser cette interconnexion. Il suppose aussi de définir la structure cible d'un tel réseau « ouvert ». De ce fait, le périmètre de notre recherche ne peut pas se réduire aux seules activités de transport mais doit aussi inclure les questions relatives à la conteneurisation des produits à mouvoir, ainsi que la détermination de leurs routes incluant l'élaboration des plans de chargement et d'expédition.
- Evaluer les impacts potentiels d'un tel système interconnecté de prestations logistiques en termes de performances économiques et environnementales. L'atteinte de cet objectif a nécessité de développer des protocoles logistiques plus opérationnels détaillant les opérations de routage des marchandises dans cette logique d'interconnexion des réseaux logistiques.

1.3 Les étapes de la recherche

Dans un premier temps, une étude bibliographique a été conduite afin d'identifier, d'une part, les facteurs antagonistes qui pèsent actuellement sur les activités logistiques, et, d'autre part, les différentes méthodologies proposées dans la littérature pour consolider les flux logistiques afin d'améliorer l'utilisation des moyens mobilisés. Dans l'optique de réaliser une interconnexion de différents réseaux logistiques hétérogènes, nous avons choisi de considérer le concept d'« Internet Physique » (Montreuil 2009) comme cadre pertinent de notre recherche.

Dès lors, notre recherche bibliographique s'est orientée vers la littérature relative à l'interconnexion des réseaux informatiques afin d'identifier les éléments clés et les règles de fonctionnement qui ont permis de s'affranchir de l'hétérogénéité de ces réseaux pour les interconnecter. Ainsi, nous avons pu retenir que la conteneurisation, la topologie du réseau résultant, les modalités d'échange des flux entre les différents réseaux et le routage compris comme la détermination de la meilleure route par rapport à un critère donné sont des facteurs critiques pour réaliser l'interconnexion de réseaux. En tenant compte des différences entre le transport de données et celui de marchandises, cette démarche d'identification nous a permis de développer des algorithmes de routage adaptés à un réseau ouvert et interconnecté, le réseau Internet Physique (PI).

Nous avons enrichi cette approche en conduisant une étude bibliographique plus spécifique sur les différents algorithmes relatifs à la recherche du plus court chemin ou encore sur le problème du sac à dos, afin de définir les protocoles adéquats à l'interconnexion de réseaux logistiques.

Cette approche était un préalable nécessaire pour simuler ce nouveau mode de fonctionnement et ainsi en évaluer les performances. Plus précisément, nous avons construit un modèle de simulation qui utilise en entrée les données réelles de la grande distribution sur le périmètre mentionné avant et définir en sortie de ce modèle un certain nombre d'indicateurs de performance. Le modèle de simulation repose sur un système multi-agents.

Finalement, en faisant varier certains paramètres de ce modèle de simulation, nous avons pu bâtir différents scénarios et les analyser afin de juger des performances potentielles d'une interconnexion ouverte des réseaux logistiques.

1.4 Organisation du mémoire de thèse

En plus de ce chapitre introductif, cette thèse est constituée de six autres chapitres dont les objectifs sont ainsi définis :

- Le chapitre 2 expose les problèmes rencontrés actuellement par la logistique pour satisfaire, d'une part, le niveau de service attendu par les activités économiques actuelles, et, d'autre part, la nécessité de réduire l'empreinte carbone qu'elle génère. Dans ce chapitre, on souligne dans un premier temps les principales méthodologies proposées dans la littérature qui ont pour objectif d'améliorer les performances du transport via la consolidation des flux. Puis, dans un deuxième temps, on développe le concept d'Internet Physique qui fait la promotion de l'interconnexion des réseaux logistiques comme une solution possible aux antagonismes que connaît la logistique de nos jours.
- Le chapitre 3 est consacré à l'étude des dimensions physique et organisationnelle nécessaires à l'interconnexion de réseaux hétérogènes. Il précisera d'ailleurs les facteurs qui expliquent cette hétérogénéité. Principalement, ce chapitre s'attache à définir la conteneurisation, la topologie du réseau interconnecté et les échanges de flux entre les différents acteurs qui composent ce réseau.
- Le chapitre 4 s'inscrit dans la continuité du chapitre précédent, dans la mesure où il contribue à définir plus précisément un des éléments clés de l'interconnexion, à savoir

le routage. De ce fait, il propose la structure des algorithmes de routage qui sont adaptés au contexte de la logistique.

- Le chapitre 5 définit les protocoles plus opérationnels qui permettent de mettre en œuvre les dimensions d'interconnexion et les règles de routage définies dans les deux chapitres précédents. Cet exposé est un préalable nécessaire afin de déterminer les algorithmes qui seront implémentés dans le modèle de simulation d'un réseau logistique interconnecté.
- Le chapitre 6 expose les premières estimations des performances attendues d'une interconnexion globale des réseaux logistiques. A cette fin, ce chapitre présente le modèle de simulation que nous avons construit et dans lequel nous avons implémenté les protocoles développés dans le cinquième chapitre. Sur la base des données réelles de la grande distribution française, ce chapitre présente les différents scénarios d'interconnexion que nous avons simulés ainsi que le système logistique actuel. Il permet donc d'exposer les résultats ainsi obtenus et de conclure quant aux performances potentielles de l'interconnexion des réseaux logistiques appelée Internet Physique. Il souligne que dans certains cas, cette démarche d'interconnexion peut conduire à une diminution des émissions de CO₂ de l'ordre de 60%, qui s'accompagne de plus d'une diminution des coûts de l'ordre de 30%.
- Le chapitre 7 présente les principales conclusions auxquelles conduit ce travail de recherche. Il résume les apports de ce travail ainsi que ses limites. Il permet enfin d'identifier les nouvelles perspectives de recherche dans le cadre de l'interconnexion des réseaux logistiques.

Chapitre 2 : L'Interconnexion des réseaux logistiques comme réponse à l'antagonisme croissant entre performances actuelles et attendues

2.1	La logistique : définition et fonctionnements	22
2.1.1	Définition de la logistique.....	22
2.1.2	La logistique : un domaine en perpétuelle évolution	23
2.2	L'antagonisme entre les performances actuelles et celles attendues	29
2.2.1	Le transport de marchandises : Activité centrale dans la logistique.....	29
2.2.2	Performance du transport de marchandises : Ce système est-il soutenable ?.....	35
2.3	Solutions face à cet antagonisme	40
2.3.1	Amélioration du transport de marchandises : Méthodologies existantes	41
2.3.2	Amélioration du transport de marchandises : De nouveaux concepts.....	43
2.3.3	L'Interconnexion des réseaux de prestation logistiques.....	44
2.4	Terrain d'étude : la grande distribution.....	50
2.5	Conclusion	54

Chapitre 2. L'Interconnexion des réseaux logistiques comme réponse à l'antagonisme croissant entre performances actuelles et attendues

Depuis ces dernières années, la logistique a accompli des progrès remarquables et ceci à plusieurs niveaux : dans la chaîne de production, dans les politiques de stockage, et particulièrement dans le transport de marchandises. Le système logistique actuel permet d'échanger des flux de marchandises de part et d'autres du globe en quelques semaines, tout en garantissant une bonne qualité de service à des prix attractifs. Nous voyons le cas, par exemple, des industriels qui peuvent se permettre de produire en Chine pour ensuite distribuer leurs produits en Europe, ou encore, le service de la messagerie rapide tel que Chronopost, Fedex, etc. qui permet d'expédier des colis en quelques dizaines d'heures à travers le monde. Ces progrès sont liés, d'une part, aux évolutions technologiques des moyens de transport (camion, navire porte-conteneur, avion, etc.) et ceux du conditionnement et de la manutention (palettes, conteneurs, chariot élévateur, portiques à conteneurs, etc.), et, d'autre part, à des progrès d'organisation. Mais ces performances cachent encore des inefficacités tout au long des chaînes logistiques et particulièrement dans le transport de marchandises. En effet, cette composante a plus d'importance aujourd'hui du fait de ses délais, de la probable hausse du prix du pétrole, des taxes et des externalités négatives qui en résultent (CO₂, particules fines, ...).

Notre étude sera axée sur une démarche en trois temps: Tout d'abord, nous nous appliquerons à définir la logistique ainsi que les activités qui s'y rapportent.

Dans un second paragraphe, nous nous attacherons à l'analyse, d'une part, des performances actuelles de la logistique et en particulier celles du transport de marchandises, et, d'autre part, des performances attendues notamment pour faire face aux exigences du développement durable. Cette analyse des performances du transport comme conséquences de la structure et de l'organisation des réseaux, justifiera le besoin d'innover à ce niveau. Puis, dans un troisième paragraphe, en se basant sur l'écart entre les performances actuelles et celles attendues au niveau du transport de marchandises, on exposera les principales méthodologies que l'on retrouve dans la littérature et qui pourraient y répondre. Nous mettrons l'accent, au sein de ce paragraphe, sur les perspectives que nous ouvre l'interconnexion des réseaux logistiques actuellement dédiés. Il s'agit d'une solution que nous retiendrons pour cette thèse.

Le principal avantage d'interconnecter différents réseaux est sans doute le niveau de partage des ressources qu'il permet d'atteindre. Dans ce cadre, nous présenterons le concept de l'Internet Physique (IP), l'idée la plus récente dans cette perspective d'accessibilité des ressources disponibles (réseaux et moyens). On a choisi de situer notre recherche dans le cadre de la grande distribution française, et une argumentation en ce sens fera l'objet du dernier paragraphe.

2.1 La logistique : définition et fonctionnements

On propose ici des définitions de la logistique ainsi que ses évolutions.

2.1.1 Définition de la logistique

Selon (Christopher 2005), « *logistic is the process of strategically managing the procurement, movement and storage of materials, parts and finished inventory (and the related information flow) through the organization and its marketing channels in such a way that current and future profitability are maximized through the cost effective fulfillment of orders* ». Il apparaît donc que la logistique s'intéresse au flux de produits (marchandises) et à celui des informations qui leurs sont attribuées. Ces produits peuvent être de nature très différente et correspondre à des produits de grande consommation (ex. grande distribution), des produits industriels (industrie automobile), des courriers (messagerie), etc.

(Pimor et al. 2008) distinguent plusieurs types de logistique en fonction de leurs objets et de leurs méthodes, parmi lesquels nous citons :

- La logistique d'approvisionnement qui permet par exemple d'approvisionner les usines en matières premières, composants et emballages nécessaires au processus de production.
- La logistique de production qui s'occupe d'alimenter les chaînes de production en quantité, en lieu et en délai souhaité et qui s'intègre à la planification de la production.
- La logistique de distribution qui, comme son nom l'indique, a pour objectif de livrer les produits finis jusqu'aux clients finaux (les consommateurs) via différents circuits de distribution.

- La logistique de soutien : qui sert à maintenir le niveau de disponibilité de systèmes complexes. On cite comme exemple le cas des ascensoristes.
- La logistique inverse qui gère les flux qui partent des clients vers le distributeur ou l'industriel, d'où l'appellation « inverse ». Il peut s'agir de produits rendus par le client car non satisfait, de produits à réparer, des déchets industriels à recycler, etc. La logistique inverse s'est beaucoup développée avec l'émergence du e-commerce et le développement du recyclage.

Dès lors, on observe que la définition d'un type de logistique dépend fortement du périmètre choisi et traduit des concepts spécifiques à chacun. Dans notre étude on s'intéressera uniquement à la logistique de distribution. Ainsi en évoquant le terme « logistique », on fera référence à cette notion.

La logistique de distribution, formée de fournisseurs et distributeurs (ce qui sera le cas de notre recherche), regroupe un ensemble d'opérations successives de stockage, de tri, de manutention, de préparation de commandes et de transport permettant d'acheminer les marchandises depuis les usines vers les points de ventes (Sétra 2012). Il s'agit donc de réseaux de prestations, qui forment ce que l'on appelle des réseaux logistiques. Le prochain paragraphe démontrera que la logistique a toujours évolué selon les besoins de ses utilisateurs.

2.1.2 La logistique : un domaine en perpétuelle évolution

La logistique a connu des évolutions au niveau de son organisation avec l'apparition de nouveaux sites logistiques, de nouveaux acteurs, ainsi que de nouvelles relations entre ces différents acteurs.

2.1.2.1 L'organisation logistique : Adaptation aux besoins des clients

La logistique est fortement liée à la politique de production, car comme l'indique (Leglise 2007) : « la logistique permet l'ajustement de l'offre (en amont) et de la demande (en aval) ». En effet, selon que le mode de production soit en flux poussés ou en flux tirés les solutions logistiques diffèrent. Dans le cas de la production en flux poussés, le stockage est très important. Par contre, dans un mode de production en flux tirés, il y a beaucoup moins de stockage et la difficulté réside dans l'optimisation des flux et l'ajustement des capacités en réduisant au maximum les différents niveaux de stocks.

La performance de la logistique peut être mesurée avec la vitesse de la circulation des produits depuis leurs origines jusqu'à leurs destinations (Pimor et al. 2008). Plus un produit passe de temps dans les réseaux logistiques, et plus les niveaux de stock seront élevés et les coûts d'immobilisation également. La logistique cherche donc à développer des moyens pour répondre aux besoins d'une distribution en flux tendu.

En effet, de nouveaux réseaux logistiques ont été conçus pour une meilleure optimisation des flux. On cite comme exemple le passage d'une logistique de l'industriel qui approvisionne un réseau de revendeur à l'approvisionnement d'une plateforme de la grande distribution qui regroupe les industriels. Ces changements dans les réseaux logistiques s'opèrent avec la création de nouveaux sites logistiques (Leglise 2007). Cela s'appuie sur (Pimor et al. 2008):

- Des entrepôts qui ont comme fonction principale le stockage des produits. On distingue les entrepôts industriels qui servent au stockage des produits expédiés par les usines, et les entrepôts distributeurs (habituellement appelés les centres de distribution) qui stockent les achats réalisés par le distributeur.
- Des plates-formes qui permettent un transit simple des marchandises entre deux moyens de transport. Sa fonction principale réside dans la préparation des commandes et des livraisons. Contrairement aux entrepôts, elles n'ont pas comme fonction de principale de stocker.

En pratique, faire une distinction entre ces deux types de sites logistiques n'est pas évidente, car le passage de la marchandise par un entrepôt peut être rapide dans le cas d'un flux tendu, et en même temps on peut se retrouver avec de la marchandise qui passe quelques heures et parfois même quelques jours dans une plateforme. De plus, un entrepôt peut réaliser d'autres fonctions que celle du stockage, comme le regroupement de commandes provenant de plusieurs fournisseurs. C'est d'ailleurs le cas aujourd'hui car certains entrepôts sont gérés par des prestataires externes (3PL), et sont utilisés pour stocker des produits provenant de différents fournisseurs. Dans la grande distribution, on parle d'entrepôts industriels et de plateformes distributeurs. Les infrastructures majeures d'attractivité économique tels que les ports et les aéroports sont considérés comme étant des plateformes logistiques car elles n'ont pas la vocation de stocker de la marchandise.

La Figure 1 représente un exemple de flux de marchandises entre deux producteurs et des points de vente via une plateforme distributeur.

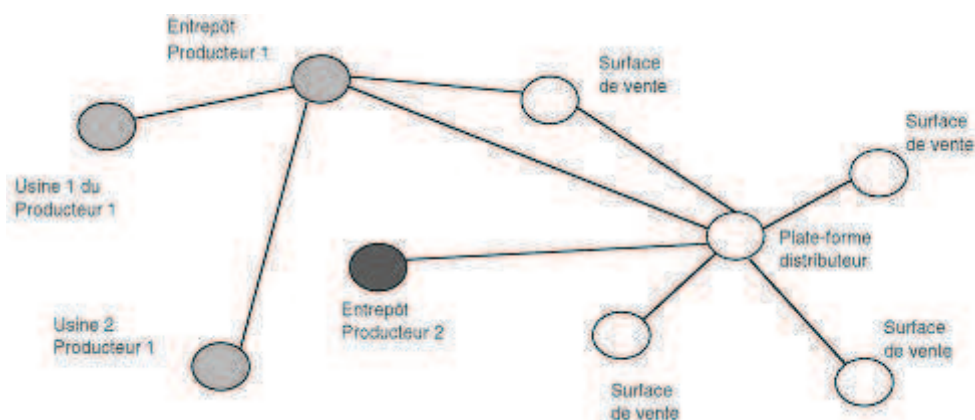


Figure 1: Flux de marchandises entre deux producteurs et des points de vente via une plateforme distributeur (Pimor 2001)

Cette organisation représente une évolution majeure pour la logistique. En effet, la distribution est passée d'un mode de distribution directe des fournisseurs aux magasins, dits à « circuit court », vers un nouveau mode de distribution qui intègre de nouveaux sites logistiques, dits à « circuits longs ». Ce changement a commencé au début des années 1980 (Sétra 2008a).

La création de ces nouveaux sites logistiques a permis d'augmenter les fréquences des livraisons et de réduire les niveaux des stocks (Sétra 2008a). Cette nouvelle organisation, qui permet de garantir des délais de livraison plus courts, est d'autant plus intéressante pour certains secteurs comme celui de la distribution des produits frais. D'autre part, ce système de distribution augmente, de par sa structure, le nombre de ruptures de charges. C'est ainsi qu'il y a eu recours au conditionnement des expéditions en palettes afin de faciliter les manutentions.

Une des conséquences de ce changement d'organisation logistique est l'apparition de nouveaux acteurs logistiques. En effet, mis à part les deux acteurs principaux qui sont les points sources et destinations des flux (d'une part les fournisseurs/industriels et d'autre part les distributeurs/clients), on note aujourd'hui la présence de prestataires intermédiaires appelés Third Party Logistics, 3 PL, qui ont la responsabilité d'exécuter une partie de la logistique de ses clients, comme la gestion d'entrepôts et du transport. On parle aussi maintenant de prestataire de quatrième génération, (Fourth Party Logistics, 4 PL), qui coordonnent l'ensemble des opérations réalisées par les acteurs logistiques, gérant ainsi

l'ensemble des flux, via des systèmes informatiques (Vaidyanathan 2005, MEEDDAT 2010). Les 4 PL n'auraient donc pas d'opérations physiques à réaliser, mais uniquement des activités de gestion.

A cet effet, (Mentzer et al. 2001) classifient les organisations logistiques qui sont devenues plus complexes selon le nombre d'intervenants. On en cite ici les deux extrêmes : le système le plus simple selon (Mentzer et al. 2001) est celui qui ne fait intervenir qu'une seule organisation commerciale chargée d'approvisionner des clients à partir des fournisseurs (Figure 2). A contrario le système le plus complexe fait intervenir plusieurs organisations commerciales intermédiaires, augmentant ainsi la complexité du système (Figure 3).



Figure 2: Système logistique simple d'après (Mentzer et al. 2001) : une unique organisation commerciale pour gérer les flux depuis les fournisseurs jusqu'aux clients



Figure 3: Système logistique complexe d'après (Mentzer et al. 2001) : Multiples organisations commerciales intermédiaires entre fournisseurs et clients.

Ainsi, aujourd'hui les réseaux logistiques ont pris une nouvelle organisation avec l'implémentation de nouveaux sites permettant de répondre à une distribution en flux tendu, indispensable pour limiter les stocks et les coûts de revient. Nous allons étudier dans le prochain paragraphe, les relations entre les différents acteurs de la logistique actuelle.

2.1.2.2 La structure des réseaux logistiques : Du Supply Chain vers le Supply Network

Depuis plus de 30 ans, la logistique ne cesse d'évoluer afin de se conformer aux nouvelles exigences de son contexte, tels que l'augmentation de la concurrence, le développement technologique, les politiques d'approvisionnements, etc. (Colin et al. 1988).

L'ensemble de ces changements ont nécessité une remise en cause des relations entre les différents acteurs vers une interaction plus forte qui nécessite une coordination entre les flux physiques et les flux d'informations gérés par des systèmes d'informations tels que les ERP, les EDI ou encore les APS (pour plus d'informations le lecteur pourra se référer à (Leglise 2007)). La logistique a donc intégré le concept de la Supply Chain, ou de la chaîne logistique, qui se réfère à un système inter-organisationnel et dont le processus est souvent modélisé comme dans la Figure 4 (Min et al. 2002).

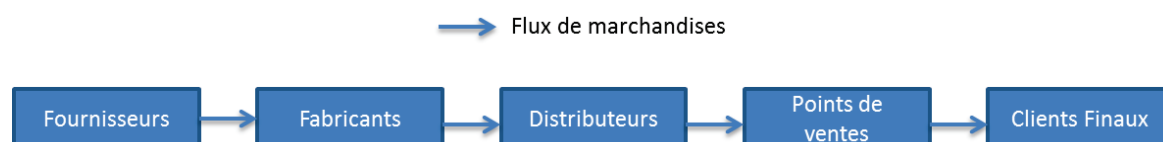


Figure 4: Supply Chain Process d'après (Min et al. 2002)

De même que pour la logistique, la notion de Supply Chain n'a pas de définition universelle. En effet, (Stadtler et al. 2000), (Lambert et al. 2000), (Roux et al. 2003) et (Chopra et al. 2004), proposent des définitions différentes, mais s'accordent pour dire que la Supply Chain représente un réseau d'organisations dont le but est de répondre au mieux aux demandes du client final. Nous citons dans ce sens la définition de (Chopra et al. 2004) : « *Supply Chains consists of all parties involved, directly or indirectly, in fulfilling a customer request* ».

C'est ainsi que dans cette organisation sous forme de chaîne, les différents partenaires se partagent des flux d'informations qui permettent a priori une meilleure planification des activités de production, de stockage et de transport afin d'opérer des livraisons « juste à temps ».

Cependant, la réalité des échanges entre les acteurs de la Supply Chain ne constitue pas vraiment une chaîne dans le sens linéaire du terme car un même fournisseur distribue à différents distributeurs et un distributeur à plusieurs surfaces de vente. C'est ainsi qu'on parle généralement de réseaux au lieu de chaînes, et par là-même on introduit la notion de Supply Network (Pimor 2001), une sorte de maillage de plusieurs Supply Chain (Burgess et al. 2006). Le système logistique est ainsi devenu un réseau d'approvisionnement (*Supply Network*). (Lambert et al. 2000) proposent à ce titre une représentation de ce que serait la Supply Network du point de vue d'un acteur logistique comme par exemple une usine dans le cas de la grande distribution (Figure 5). Cette usine possède donc un réseau amont avec plusieurs fournisseurs (usines de production), eux-mêmes ayant d'autres fournisseurs, etc., et un réseau

aval composé par exemple d'entrepôts industriels, qui serviront par la suite des plateformes de distribution chargées de livrer des points de ventes. Le réseau représente donc une double arborescence.

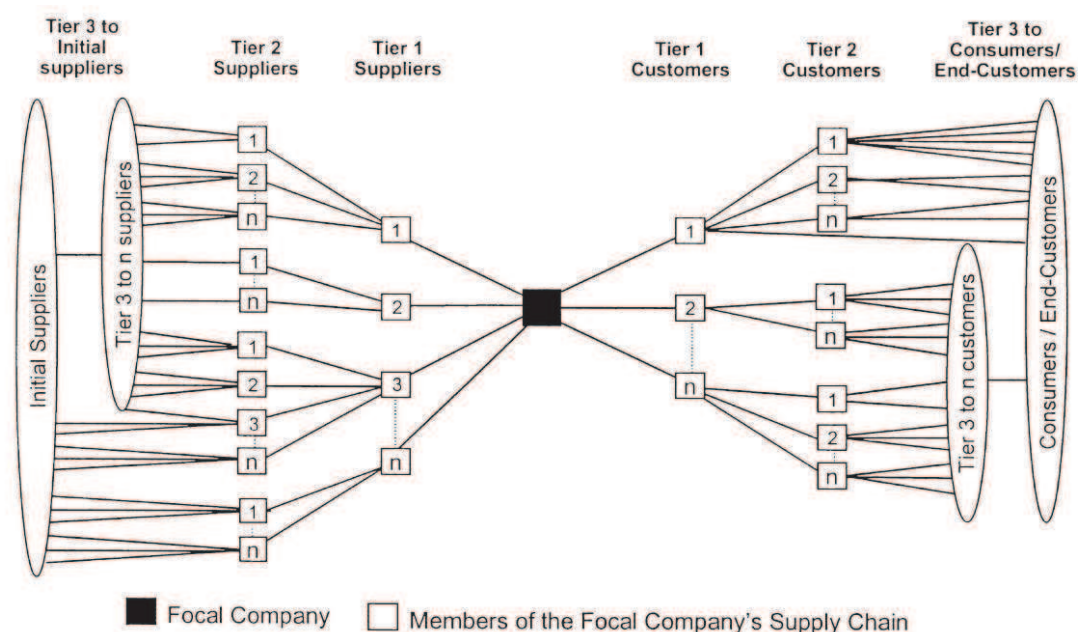


Figure 5: Structure du Supply Network (Lambert et al. 2000)

Cette structure est donnée du point de vue d'un unique acteur, en l'occurrence dans notre exemple, une usine. Il est important de noter que pour chaque usine dans un territoire donné, on aura un autre Supply Network avec certainement des fournisseurs et/ou des clients en commun. Ces différents Supply Network ne sont pas interconnectés et travaillent indépendamment sauf indication contraire. Il s'agit donc de réseaux dédiés même si des sites logistiques peuvent être en commun.

Nous avons ainsi analysé l'évolution de la structure de la logistique, qui après s'être orientée vers la Supply Chain, est maintenant considérée comme un réseau d'approvisionnement. Cette notion de réseaux logistiques est un concept essentiel dans notre recherche vu que notre objectif est d'étudier leurs interconnexions, pour une meilleure utilisation des ressources.

Dans le prochain paragraphe, nous nous proposons d'analyser les performances de la logistique actuelle et de les comparer à celles attendues aux vues des prévisions futures.

2.2 L'antagonisme entre les performances actuelles et celles attendues

Le transport de marchandises est une activité centrale dans la logistique. Cette idée sera argumentée dans un premier temps, puis nous passerons à l'analyse de la soutenabilité du système logistique actuel.

2.2.1 Le transport de marchandises : Activité centrale dans la logistique

Après avoir présenté quelques chiffres révélateurs de l'importance de l'activité du transport dans la logistique, nous verrons quels sont les facteurs qui font que son poids est sans cesse grandissant. A partir de là, il serait intéressant d'analyser les scénarios possibles quant à nos besoins futurs en matière de transport.

2.2.1.1 Le transport de marchandises dans la logistique : un poids de plus en plus important

En France, le transport de marchandises coûte à lui seul plus de la moitié des coûts logistiques avec 54% des coûts engendrés par les diverses activités logistiques en 2009 (Source l'ASLOG : Association française pour la logistique).

D'autre part, le transport à lui seul représente près de la moitié des emplois générés par la logistique. En 2004, les activités logistiques employaient près de 1,5 millions de salariés, dont 700 000 uniquement dans le secteur du transport de marchandises (Mariotte 2007).

Le transport de marchandises a donc un poids prédominant en tant qu'activité logistique. Ce poids est en net progrès car la répartition des coûts logistiques change avec une part plus grande pour le transport (Figure 6) vu l'augmentation des prix de l'énergie (carburant).

D'autre part, l'activité du transport de marchandises est en constante évolution avec des besoins croissants comme le montre la Figure 7 (Source : INSEE, SOeS, Compte des Transports).

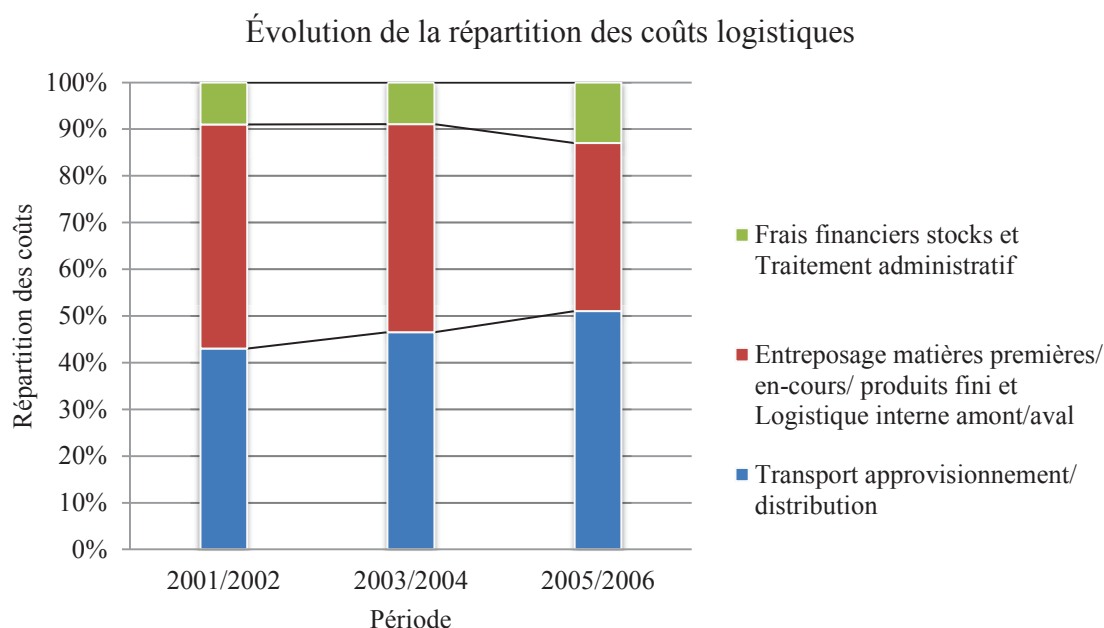


Figure 6: Évolution de la répartition des coûts logistiques (ASLOG 2006)

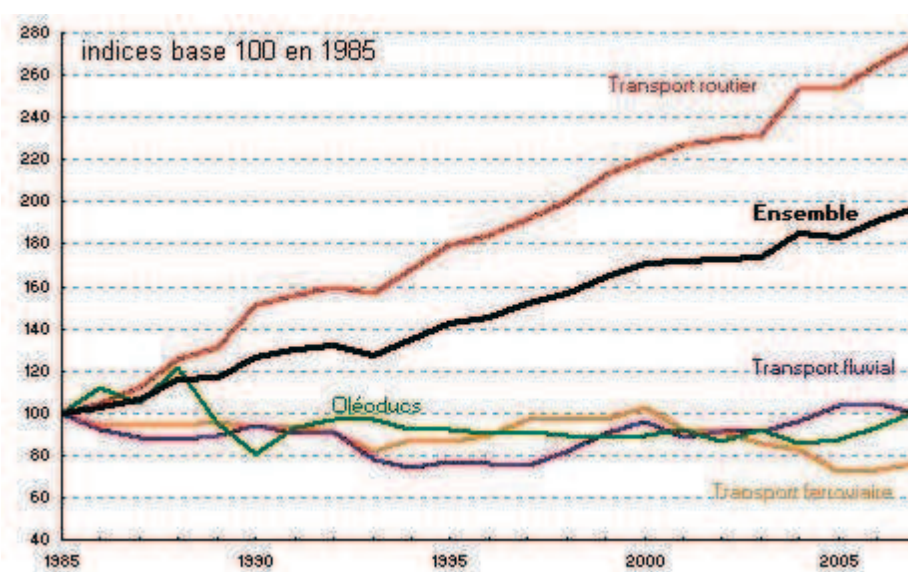


Figure 7: Transport intérieur de marchandises par mode en France, en tonnes-km (SOeS, Compte des Transports)

Les chiffres que nous avons présentés dans ce paragraphe ne vont pas au-delà de l'année 2007, car nous avons préféré ne pas prendre comme référence la période de la crise économique (débutant en 2008) et pendant laquelle le transport a naturellement été impacté. D'ailleurs, la croissance du fret repart aujourd'hui car d'après l'INSEE - 2010 « *l'ensemble du transport intérieur terrestre de marchandises montre une reprise (+ 3,3% en t-km) après un recul sur*

deux ans, ...Cette reprise est concomitante de la reprise de l'activité économique d'ensemble».

Intuitivement, on pourrait aussi penser que le poids du transport en termes d'émission en CO₂ est prédominant par rapport aux autres activités logistiques, vu la consommation en carburant qu'il nécessite. Il faudrait cependant analyser la part réelle des émissions émises dans les surfaces de stockage pour s'en convaincre. Ce ratio entre les émissions générées par le transport et celles des autres activités logistiques, est certainement moins évident dans le cadre de la logistique des produits frais et surgelés.

2.2.1.2 Augmentation du transport de marchandises: Pourquoi ?

(Dornier 1997) a analysé les raisons de l'augmentation incessante du besoin en logistique et a montré qu'elles étaient principalement dues aux évolutions des stratégies des distributeurs et des industriels. Nous allons donc reprendre les principaux concepts de son analyse en se concentrant sur les impacts des évolutions des stratégies des fournisseurs et des distributeurs sur l'activité du transport.

(Dornier 1997) considère que la mondialisation a provoqué des changements de stratégies côté fournisseurs (industriels), et en dénombre quatre.

La première est la délocalisation de la production, qui impose donc des distances géographiques supérieures entre les points de production et les points de consommation, et en conséquence une augmentation des tonnes-km.

La seconde est la différenciation retardée qui consiste à rapprocher certaines opérations de production des points de consommation en autorisant des sites logistiques, tels que les plateformes, à effectuer ces opérations. La différenciation retardée a donc comme conséquence la réduction des tonnes-km.

La troisième est le juste-à-temps, qui repose sur le fait de livrer la quantité dont on a besoin, au bon moment, et au bon endroit (Harrison et al. 2005). Cette stratégie a pour but de limiter les stocks, en augmentant les fréquences des livraisons qui seront de tailles réduites, ce qui nécessite plus de véhicules-km vu la dés-optimisation des chargements.

La quatrième stratégie est la spécialisation des unités de production qui permet de faire des économies d'échelle dans la production, et qui implique directement une augmentation des tonnes-km. En effet, la recomposition des gammes commerciales entre les différentes unités spécialisées de production augmente les flux.

Ainsi, mise à part la différenciation retardée, les différentes stratégies industrielles nécessitent un accroissement du transport. Analysons maintenant les stratégies du côté des distributeurs.

Les distributeurs quant à eux ont conduit des stratégies répondant à leurs besoins marketing de commercialisation ainsi qu'aux besoins des consommateurs et à la concurrence. Ces stratégies sont au nombre de trois (Dornier 1997).

La première est la diversification des canaux de distribution afin de mieux servir les clients, ce qui accroît les véhicules-km vu l'augmentation du nombre de points de vente et donc la déconcentration des flux.

La seconde est l'augmentation de l'assortiment, une stratégie marketing nécessaire pour une personnalisation des besoins. Cette stratégie augmente le nombre de produits offerts à la clientèle, espérant ainsi un meilleur recouvrement des besoins. Elle nécessite également davantage de véhicules-km car la taille des lots diminue, et par conséquent la fréquence de livraison augmente.

Finalement, la troisième stratégie des distributeurs est l'accélération de la rotation des stocks qui sert à réduire leurs niveaux d'immobilisation, ce qui augmente bien évidemment les fréquences des livraisons moins volumineuses, et par suite les véhicules-km.

On remarque donc que l'ensemble des changements opérés au niveau des stratégies des distributeurs a diminué les volumes expédiés, nécessitant ainsi plus de véhicules-km.

On voit donc que les changements de stratégies en amont et en aval ont des répercussions directes sur les besoins en transport. C'est ainsi que l'allongement des distances causé par la dispersion géographique des sites de production et des points de consommation, et l'augmentation de la fréquence des livraisons due à la diminution de leurs tailles, traduisent un besoin croissant en transport de marchandises. Si nous considérons le besoin en tonnes-km, par exemple, on voit qu'une augmentation de plus de 30% a été enregistrée entre 1997 et 2007 (SOeS, Compte des Transports). Mais en sera-t-il de même demain ? Aurons-nous toujours ce même besoin grandissant en transport de marchandises ?

2.2.1.3 Besoins futurs en transport de marchandises : Scénarios possibles

Concernant les tendances futures pour le besoin en transport de marchandises, une étude a été réalisée dans ce sens, pour le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement

Durable et de l'Aménagement du Territoire, et qui a établi quatre scénarios possibles pour l'horizon 2030 (Duong et al. 2008). Le Tableau 1 résume ces différents scénarios.

Tableau 1: Scénarios du besoin en transport de marchandises à l'horizon 2030 (Duong et al. 2008)

Scénarios possibles	Régulation minimale (non rééquilibrage modal)	Régulation forte (rééquilibrage modal)
Couplage (entre économie et transport)	Scénario 1 : La Firme Mondiale	Scénario 2 : Régulation par l'économie
Découplage (entre économie et transport)	Scénario 3 : Petites Europes	Scénarios 4 : PeakOil

Les quatre scénarios sont définis par le croisement de deux dimensions. La première étant la régulation forte ou faible des autorités publiques en faveur d'une organisation logistique plus écologique œuvrant pour une amélioration du transport routier et pour un transfert d'une partie du fret vers d'autres moyens de transport. La seconde hypothèse, concerne l'hypothèse de couplage ou de découplage entre la croissance de l'économie et celle du transport.

Le premier scénario, «La firme mondiale» suppose une augmentation du transport mais avec peu ou sans régulation de l'Etat. Dans ce cas le trafic serait principalement routier.

Le second scénario, «Régulation par l'économie» table sur une plus grande intervention de l'Etat via des tarifications et des réglementations permettant d'orienter le transport vers d'autres moyens outre ceux de la route. Il suppose également une forte croissance en matière de transport.

Le troisième scénario, «Petites Europes», prend comme hypothèse une augmentation très forte du prix du pétrole, avec des coûts de transports qui explosent. Ceci conduit donc à un découplage entre la croissance économique et la demande en transport. Cette hypothèse, impliquerait donc une relocalisation des points de production dans la région européenne afin de réduire les coûts liés au transport.

Le quatrième scénario, le «PeakOil», suppose une raréfaction du pétrole suivi d'une crise dans les transports. Il table sur l'instauration des pouvoirs publics d'un système de quotas dans la consommation des énergies, impliquant de fait une réduction des trafics.

Pour chacun de ses quatre scénarios, le Tableau 2 regroupe des estimations en besoin-transport de marchandises pour l'horizon 2030 en France, avec comme référence de comparaison le transport réalisé en 2002.

Tableau 2: Estimation du transport de marchandises en France en 2030 (d'après (Duong et al. 2008))

G tonne-km	2002	2030 (Scénario 1)	2030 (Scénario 2)	2030 (Scénario 3)	2030 (Scénario 4)
Transport Routier	257	412	340	296	272
Transport ferroviaire	50	50	80	76	87
Transport fluvial	6.9	7	20	15	20
Total	314	469	440	387	379

On voit clairement le total du besoin en transport augmenter indépendamment des moyens. Ainsi, même dans le scénario le moins favorable à l'utilisation du transport, à savoir le scénario « PeakOil », on estime que le besoin sera plus grand que celui exprimé en 2002, avec une différence de plus de 20%. On peut donc conclure que le transport de marchandises sera en forte expansion et que la question de sa performance devra se situer au centre des préoccupations.

La performance de la logistique est donc liée à celle du transport, qui représente non seulement un poids financier important mais qui est en plus en constante évolution. Cependant ce système logistique sera-t-il apte à répondre à nos besoins futurs ? Sera-t-il assez performant pour être en mesure d'absorber les prévisions futures ? Notre système de fret actuel ne comporte-t-il pas des limites économiques, environnementales ?

Afin de trouver réponse à ces questions pertinentes, nous allons dans un premier temps analyser la performance actuelle du transport de marchandises, ce qui nous amènera à évaluer les difficultés du système logistique actuel, et remettre en question sa viabilité pour l'avenir.

2.2.2 Performance du transport de marchandises : Ce système est-il soutenable ?

Nous avons montré, dans le paragraphe précédent, l'importance que tient et que tiendra encore à l'avenir (selon les estimations de (Duong et al. 2008)) le transport de marchandises en tant que part prépondérante de l'activité logistique. La question qui se pose est de déterminer si ce mode de transport sera encore capable de répondre à nos besoins futurs. C'est ce que nous nous proposons d'étudier.

L'analyse de la performance du transport de marchandises tel qu'il se présente aujourd'hui nous amènera à démontrer le caractère insoutenable à long terme de ce système.

2.2.2.1 Performance du transport de marchandises

Au niveau national, le transport routier est de loin le mode de transport le plus utilisé aujourd'hui dans le fret. La Figure 8 illustre parfaitement la prédominance de ce mode de transport de marchandises (TRM¹) avec 82% du fret transporté via la route en 2007.

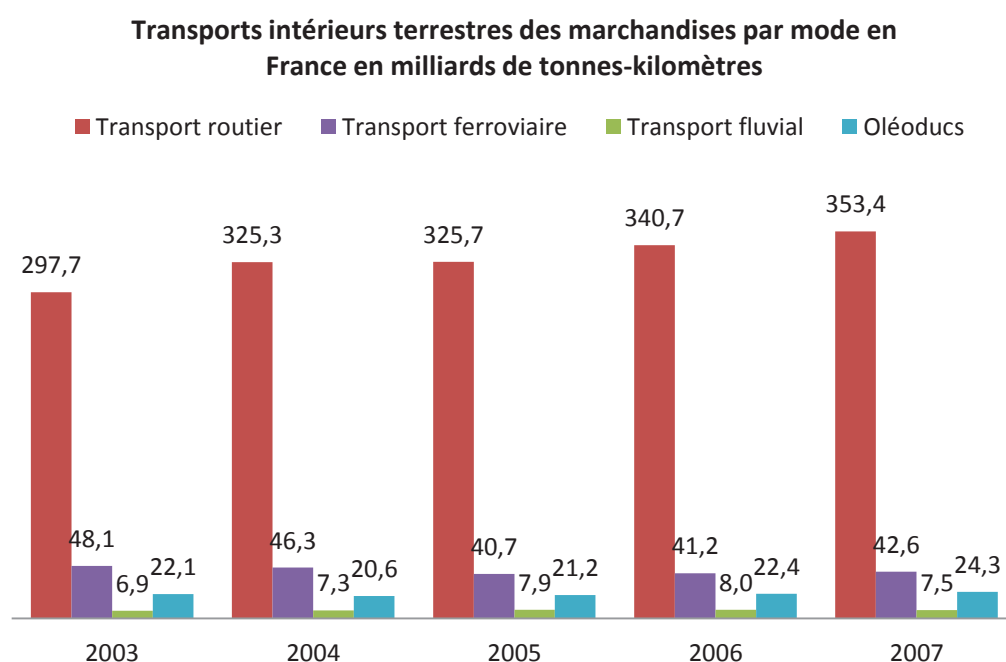


Figure 8: Transports intérieurs terrestres des marchandises par mode en France (Source INSEE, SOeS, Compte des Transports)

¹ TRM : Transport routier de marchandise

On remarque que la part du transport routier est de plus en plus grande, ce qui conforte sa position dominante. En 2011, c'est 88.7% du fret (en tonnes/km) qui étaient transportés par la route (MEEDDAT 2011). De plus, au niveau prévisionnel, les différents scénarios établis par (Duong et al. 2008) tablent sur une dominance du TRM. En effet, le TRM serait dans tous les cas le premier mode de transport de marchandises avec une part variant de 72% (scénario 4 : « Peakoil ») à 88% (scénario 1 : « La firme mondiale »). Cette dominance du TRM nous permet de nous concentrer sur les performances de ce mode de transport qui représente à lui seul la quasi-totalité des transports des marchandises.

Ainsi, McKinnon a réalisé une enquête sur un millier de camions utilisés pour le transport dans la grande distribution au Royaume-Uni afin de mesurer un certain nombre d'indices de performance (McKinnon et al. 2003). Cette enquête montre que les camions ne sont remplis qu'à hauteur de 53% de leurs capacités en poids et que les trajets à vide représentent près de 19% des km parcourus. Ce taux est proche de celui mentionné dans le rapport (PIPAME et CNAM 2009), qui déclare que 20% des trajets concernant le fret national français sont parcourus à vide. D'autre part, McKinnon a aussi étudié l'immobilisation des camions, et trouve que ces moyens ne sont mobilisés sur les routes que 28% de leurs temps. Même si on ne peut pas considérer les temps de chargement et de déchargement comme ceux de repos ou d'attentes, il est important de noter que cette étude montre que 28% du temps est qualifié de libre. Dans ce même cadre, mais cette fois-ci dans le périmètre de la grande distribution française, une étude menée par (Ballot et al. 2008) a calculé ce qu'ils ont nommé le Taux de Rendement Synthétique (par analogie au TRS dans les systèmes de production) qui vient mesurer l'efficacité des moyens de transport, et on trouve des taux inférieurs à 11% d'efficacité.

En termes d'émission, la situation est plus préoccupante car le transport à lui seul émettrait près de 33% de la totalité des émissions CO₂ en 2008 (Fontelle et al. 2003). Le TRM (transport routier de marchandise) génère à lui seul près de 43% des émissions en CO₂ dues au transport, et donc 15% du total des émissions en France. Elles sont aussi en constante augmentation, vu la croissance du besoin en TRM.

L'ensemble de ces chiffres s'accordent pour dire que de grands progrès peuvent être réalisés dans le transport routier puisqu'il est largement sous-utilisé et particulièrement émetteurs en CO₂. On manque par ailleurs de données sur le transport ferroviaire mais des marges d'efficacité y sont également sans nul doute présentes.

Mais quelle sera la viabilité de ce système logistique face à des prévisions de croissance du transport de marchandises ?

2.2.2.2 Un système logistique insoutenable

La question environnementale semble être au centre des problématiques futures. Notre système actuel, très polluant, sera-t-il compatible avec les besoins futurs ? Sera-t-il adapté aux nouvelles exigences internationales en termes d'émissions ?

Plusieurs auteurs ont étudié la durabilité d'un système logistique en vue des exigences futures et notamment environnementales (Duong et al. 2008, DHL 2010, Piecyk et al. 2010, DHL 2012). Pour illustrer ces propos, analysons d'une part l'historique des émissions en CO₂ dues au transport de marchandises en France, et d'autre part les exigences européennes qui prévoient de diviser par quatre les émissions à l'horizon 2050, par rapport à celles enregistrées en 1990 (European Commission 2011).

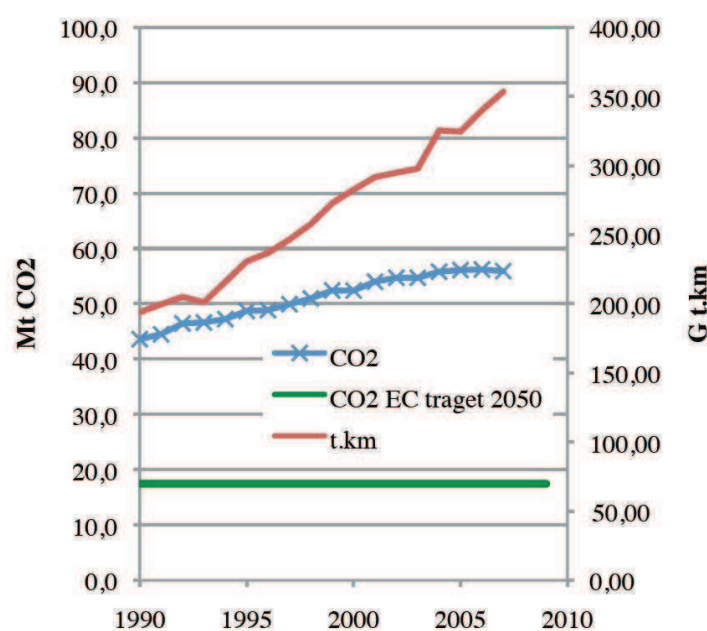


Figure 9: Croissances comparées des flux de marchandises en France, de leurs émissions et de l'objectif européen pour 2050

La Figure 9 montre que les évolutions des émissions en CO₂ relatives au transport de marchandises en France ne cessent de croître, une évolution semblable à celle de plusieurs pays développés (Serveau 2011). Il y a eu des efforts de réduction de ces émissions qui passent par exemple par des véhicules moins polluants ou moins énergivores ou par une

meilleure organisation des réseaux logistiques. Ces efforts se traduisent par une évolution moins rapide des émissions par rapport aux tonnes-km. Cependant, il est clair que malgré ces efforts, les courbes accusent une croissance nette des émissions alors que l'objectif global est de réduire d'un facteur quatre les émissions en transport à l'horizon 2050/1990. (European Commission 2011).

Même si dans ce contexte, on peut imaginer d'autres efforts de réduction au niveau transport pour l'atteinte de tels résultats, il reste un écart significatif qui ne relève pas de l'amélioration continue ou de la tendance.

Le transport routier représente à lui seul 25%, au niveau mondial, des émissions en CO₂ et 30% dans les pays de l'OCDE (OECD 2007, Raux 2007). Compte tenu de ce poids, il serait hasardeux de prétendre pouvoir réduire par quatre les émissions d'ici 2050 sans un changement radical du système logistique.

Si nous analysons la topologie des flux logistiques actuels, nous comprendrons une des origines principales de ce manque d'efficacité. En effet, considérons la Figure 10 qui représente des échanges de flux réels entre des usines, des entrepôts et des centres de distributions (ceci concerne deux grands distributeurs français et les principaux fournisseurs communs). Il faut noter que chaque flux représenté par cette figure correspond à une prestation de transport qui se fait de manière individuelle, indépendamment des autres prestations. On remarque ici une source de gaspillage car des flux peuvent être géographiquement superposés mais sont en réalité transportés indépendamment les uns des autres. On voit donc que cette topologie des réseaux logistiques dédiés et indépendants réduit les possibilités de regroupement des flux, et ainsi les performances du transport. Dans le prochain chapitre, nous détaillerons plus amplement cette analyse des flux.

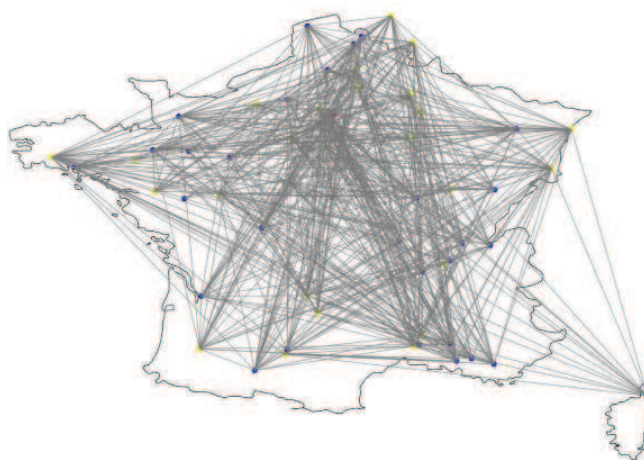


Figure 10: Superposition des flux dans les chaînes d'approvisionnement actuelles (exemple de la grande distribution en France) (Sarraj et al. 2012b)

A cet effet, plusieurs auteurs confirment le caractère insoutenable des schémas logistiques actuels. En effet, (Ballot et al. 2010) estiment que l'organisation même des réseaux logistiques actuels *« génère des gaspillages par la prolifération des transports intempestifs entre des lieux de production et de stockage souvent dédiés à chaque organisation et générant des allers- retours et des attentes pouvant finalement se transformer en obsolescences donc en rebuts de produits. Le passage par des prestataires, qui pourrait en partie améliorer le fonctionnement de la logistique, le masque partiellement du fait de la difficulté pour chacun sur un marché atomisé de trouver des synergies entre clients aux exigences multiples et antagonistes »*. C'est ainsi qu'ils reprennent une hypothèse déjà étayée par plusieurs études sur le transport de marchandises tels que (Kamakaté et al. 2009) et (Piecyk et al. 2010), qui consiste à dire que des modifications dans les organisations logistiques, qui sont la source des flux de marchandises, peuvent apporter une contribution importante dans le cadre d'un système durable.

De plus, (Montreuil 2009) a ainsi établi une liste d'éléments prouvant que l'organisation actuelle avec des schémas logistiques dédiés était insoutenable. Il note que la fragmentation de l'organisation logistique actuelle limite la consolidation des flux et ainsi la mutualisation des moyens car les flux sont divisés. De plus, elle augmente les détours avec les concepts de hubs qui sont une sorte de point de passage obligé. Puis, (Joumard 1999) estime que cette organisation limite l'utilisation des moyens de transport massif tel que les trains dont les performances économiques et surtout environnementales sont indiscutables. Ensuite, (Patier 2002) atteste, dans son étude, de l'impact négatif d'une telle fragmentation sur la saturation des infrastructures et particulièrement dans les zones urbaines. D'autres éléments ont été présentés (Montreuil 2009), toujours dans cette optique des effets néfastes de l'indépendance entre les réseaux de prestations logistiques, ils concernent le conditionnement, les remplissages partiels, les trajets à vide, les conditions de travail pénibles, l'absence de développement du multimodal, l'entreposage loin des besoins, les flux intempestifs, le manque d'innovation, le déficit de sécurisation, la difficulté de déploiement des technologies intelligentes, etc...

Face à ces défis qui nous attendent, il convient donc d'améliorer le système actuel du transport de marchandises en proposant des solutions.

2.3 Solutions face à cet antagonisme

L'amélioration des chaînes ou des réseaux logistiques et plus particulièrement le transport de marchandises peut se faire à différents niveaux et pas uniquement d'un point de vue logistique. La (Commission Européenne 1998) a identifié différents axes de recherches pour la réduction des émissions en CO₂ (Figure 11). Parmi les axes prioritaires, on note ceux de l'éco-conduite, les véhicules électriques ou hybrides, l'utilisation de nouvelles énergies comme les agro carburants de seconde génération, la régulation qui passe par l'instauration de nouvelles taxes ou l'augmentation de taxes existantes (ex : TIPP) de façon à réduire les transports... ou encore la recherche de nouvelles organisations logistiques.

(Teissier et al. 2008, Savy 2010) a réalisé une étude afin d'évaluer la contribution de ces axes de recherches à la réduction des émissions de CO₂, en définissant trois scénarios plus ou moins optimistes. Pour l'éco-conduite, les gains en émissions sont estimés entre 1.5 et 5% à l'horizon 2050. De même, les estimations sont de l'ordre de 2.5 % pour les agro carburants de seconde génération, de 5% pour la régulation, de 20% pour les véhicules hybrides et de 20% pour de nouveaux schémas logistiques. Il paraît donc que l'organisation des schémas logistiques est une piste privilégiée pour la réduction des émissions en CO₂, et nous avons choisi d'y consacrer notre travail de recherche. Cette thèse s'inscrit donc dans une perspective d'innovation dans ce domaine.

Eco-conduite	Véhicule électrique	Nouvelle motorisation	Nouvelles énergies
Transport Multimodal	Nouvelles orga. Logist.	Régulation	Autres

Figure 11: Axes de recherches pour la réduction des émissions enCO₂ liées au fret la
(Commission Européenne 1998)

Nous nous appliquerons donc à formuler de nouvelles organisations logistiques qui tenteront de remédier aux défaillances du système actuel de transport de marchandises. Cette approche a déjà fait l'objet de plusieurs recherches qui ont abouties à des méthodologies d'amélioration différentes dont certaines sont bien connues et bien implémentées, et d'autres, très récentes, qui ne sont pas encore mises en œuvre ou alors dans de très rares cas.

Un état des lieux des méthodologies connues et déjà développées sera établi dans la suite de notre étude. Puis, nous procéderons à l'analyse de nouveaux concepts, liés eux aussi à la recherche de l'amélioration de la performance. Enfin nous détaillerons la solution que nous aurons retenue, à savoir l'interconnexion des réseaux logistiques.

2.3.1 Amélioration du transport de marchandises : Méthodologies existantes

Plusieurs concepts ont été élaborés par le passé pour améliorer les performances logistiques, en particulier celles du transport de marchandises. Ces méthodologies bien connues, s'appliquent à consolider les flux en regroupant des chargements indépendants dans le but de les expédier ensemble, réalisant ainsi des économies d'échelle. (Hall 1987) définit la consolidation comme étant « *the process of combining different items, produced and used at different locations and different times, into single vehicle loads* ».

La consolidation des flux logistiques touche plusieurs concepts comme la collaboration horizontale ou encore la tournée de véhicule. C'est dans ce cadre que (Pan 2010) a classifié les différentes stratégies de consolidation en trois types : la consolidation des stocks par transport direct, la consolidation par les moyens de transport, la consolidation en réseau.

La première stratégie, la consolidation des stocks par transport direct, consiste à regrouper les produits finis en amont dans un site de stockage tel qu'un entrepôt afin d'atteindre des niveaux de volume suffisant pour des expéditions optimales, comme des camions pleins en poids ou en volume. Une expédition pouvant servir plusieurs clients. Plusieurs travaux ont été réalisés dans ce sens. Nous citons par exemple, le recours à un prestataire 3PL (Troisième Partie Logistique) qui se charge de la consolidation des flux au niveau d'un ou de plusieurs points de stockage, ainsi que des expéditions (Cheung et al. 2003) et (Tyan et al. 2003). Ces auteurs ont montré le gain potentiel en termes de transport grâce à ce type de consolidation. La consolidation des stocks par transport direct est beaucoup utilisée dans les entreprises aujourd'hui vu la facilité de mise en œuvre. Cependant, elle est de plus en plus remise en cause car elle ne correspond pas aux principes des flux tendus tel que le juste temps (Pan 2010).

La consolidation par les moyens de transport repose sur le fait qu'un moyen de transport puisse livrer une liste de points (clients) transportant ainsi différents produits, et aussi en ramasser d'autres. Le problème le plus connu est celui de la tournée de véhicule. Ce type de stratégie a pour but de limiter le nombre de moyens utilisés et donc les coûts de transports et

elle est utilisée notamment pour les petits volumes (Burns et al. 1985). La mise en œuvre d'une telle stratégie pose des difficultés opérationnelles dues principalement aux difficultés qu'ont les entreprises, qui sont généralement des PME en France, à établir une bonne visibilité sur les demandes futures (Bernadet 1997).

La consolidation en réseau est un troisième type de stratégie de consolidation, qui contrairement aux autres n'est pas d'ordre opérationnel mais plutôt organisationnel car il s'agit de la conception des réseaux de distribution (Ambrosino et al. 2005). Nous citons à titre d'exemple les Hubs qui représentent un point central permettant la consolidation de plusieurs produits d'origines différentes qui seront ensuite réexpédiés directement de ce centre vers les destinations des commandes. Ces Hubs permettent de mieux utiliser les moyens de transport. Un trop grand nombre de hubs générerait des coûts insupportables dus à leur existence (infrastructures et stocks de sécurité) et réduiront aussi les possibilités de consolidation. A contrario, trop peu de Hubs générerait soit des km inutiles, soit limiterait les possibilités de consolidation. La question qui se pose est de déterminer la quantité optimale de hubs ainsi que leurs localisation (Nozick et al. 1998), (Nozick et al. 2001) et (Chopra et al. 2004). Cependant, le recours à un tel concept génère aussi des difficultés. En effet, (Zäpfel et al. 2002) ont étudié les difficultés dues à l'utilisation des hubs, et révèlent qu'ils allongeraient dans certains cas, notamment lorsque source et destination sont proches, les distances parcourues par les marchandises pour arriver à leurs destinations car elles sont obligées de passer par des hubs.

Un second exemple de cette stratégie de consolidation en réseau est le concept du Cross-docking qui diffère de celle des Hubs par le fait qu'il s'agit d'un centre de transit n'assurant pas la fonction de stockage, comme peut l'être un Hub (Pooley et al. 1992, Swaminathan et al. 1998). Le Cross-docking est utilisé pour les produits frais, qui imposent une logistique rapide limitant ainsi les stocks (Rognon 2009). Des difficultés de mise en œuvre existent aujourd'hui et limite ses gains potentiels. Elles se résument principalement dans la difficulté et la nécessité d'avoir un système d'information performant permettant l'éclatement des flux entrants et la réalisation des nouvelles palettes avec des expéditions dans des délais assez courts. C'est ainsi que le Cross-docking se focalise principalement sur la logistique des produits frais (Rognon 2009).

Ces différents concepts de consolidation, bien connus par les chercheurs et les professionnels de la logistique, ont fait leurs preuves, et dans bien des cas existent déjà. A titre d'exemple, la grande distribution utilise déjà la notion de hubs avec les plateformes distributeurs, le Cross-docking pour les produits frais, la tournée de véhicule pour servir les magasins de proximité,

etc. Mais ces méthodologies s'avèrent insuffisantes, vu les performances du système logistique, qui utilise déjà l'ensemble de ces concepts.

D'autres méthodologies de consolidation ont récemment vu le jour, qui ne sont pas encore implémentées, ou parfois très peu, et dans certains cas en cours de conceptualisation. Le prochain paragraphe est consacré à ces innovations.

2.3.2 Amélioration du transport de marchandises : De nouveaux concepts

Les nouveaux concepts, que nous avons constatés dans le cadre de la recherche de nouvelles organisations logistiques, s'intègrent dans une stratégie de consolidation en réseau. A cet effet, un concept assez récent a vu le jour, à savoir la collaboration horizontale (Cruijssen et al. 2007a, Cruijssen et al. 2007b, Naesens et al. 2009). (Pan 2010), dans le cadre de la logistique dans la grande distribution, s'inscrit dans cette démarche en soulignant que *« la mutualisation logistique correspond à la co-conception, par des acteurs ayant un objectif commun, d'un réseau logistique dont les ressources sont mises en commun (entrepôts, plateformes, moyens de transport, etc.) afin de partager des schémas logistiques, ainsi que la mise à disposition à un ou des tiers des données nécessaires à la gestion. Il s'agit d'une coalition à moyen/long terme destinée à améliorer la performance logistique sur plusieurs de ses dimensions : utilisation des ressources, fréquence... Par la recherche d'un objectif commun et des implantations proches, la mutualisation convient à des chaînes logistiques qui opèrent dans les mêmes filières. C'est une démarche qui par son efficacité peut rencontrer les préoccupations du développement durable »*. L'objectif de cette approche de mutualisation est donc une massification des flux de plusieurs entreprises afin de mieux tirer parti des moyens logistiques en concevant des schémas logistiques mutualisés. Il a également été démontré que cette méthodologie peut permettre une réduction des émissions en CO₂ allant de 14% à 50% (Pan et al. 2011). De nos jours, les expériences concrètes de collaboration horizontale sont rares et elles sont limitées à un nombre très restreint de partenaires. Des questions clés, telles que la complexité de la formation de la coalition, le partage des gains de la coalition, et le manque de flexibilité limitent aujourd'hui le déploiement de telles solutions logistiques.

Un nouveau concept original, qui peut être vu comme un prolongement de la collaboration horizontale a été récemment proposé (Montreuil 2009). Il s'agit de l'Internet Physique, qui propose un partage global des ressources et des schémas logistiques, que l'on peut comprendre comme une sorte de généralisation de la mutualisation. L'Internet Physique

propose d'interconnecter les différentes prestations logistiques pour en faire un réseau de réseaux ouvert dans lequel il y aura une consolidation de l'ensemble des moyens de la chaîne logistique. Ceci pourrait générer des gains significatifs en termes financier et environnemental, vu le niveau de consolidation qu'il prétend atteindre. Cette notion d'interconnexion « universelle » ouvre en effet des perspectives intéressantes à étudier en offrant une nouvelle offre de services logistiques, à l'image de l'Internet en tant qu'interconnexion universelle des réseaux informatiques (Sarraj et al. 2012b).

L'interconnexion des réseaux logistiques est aujourd'hui le concept plus avancé en termes de potentialités (Montreuil 2009), c'est pourquoi nous avons choisi ce cadre de recherche pour développer notre travail doctoral.

L'Internet Physique est un concept récent qui a besoin d'être développé car seuls quelques principes fondamentaux ont été jusque-là énoncés. Cette thèse a donc pour objectifs de définir des éléments clefs de l'Internet Physique et par la suite d'en mesurer le potentiel.

Dans le paragraphe qui suit, nous viendrons exposer l'intérêt de se diriger vers une telle interconnexion par opposition aux schémas logistiques actuels. Le concept de l'Internet Physique repose nécessairement sur cette idée, mais sa définition dans sa globalité et ses concepts seront présentés ultérieurement.

2.3.3 L'Interconnexion des réseaux de prestation logistiques

Nous avons souligné que l'efficacité du fret n'est aujourd'hui pas suffisamment performante pour faire face aux défis futurs et surtout pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de GES fixés par la Commission Européenne, à savoir la réduction par un facteur 4 d'ici 2050. Nous avons par ailleurs souligné dans le paragraphe précédent, que l'interconnexion des réseaux logistiques basée sur une meilleure utilisation des ressources logistiques, pourrait être une solution pour rencontrer ces enjeux.

Nous allons dans une première partie montrer comment l'interconnexion des réseaux logistiques peut permettre de dépasser les problèmes rencontrés. Ensuite nous analyserons les gains attendus d'un tel principe d'interconnexion. Finalement, on présentera le concept de l'Internet Physique tel qu'il a été défini, qui repose principalement sur ce principe d'interconnexion, mais intégrant aussi d'autres éléments.

2.3.3.1 Potentiel de l'Interconnexion des réseaux

Afin de montrer le potentiel d'interconnexion des réseaux logistiques, nous allons nous baser sur le cas réel des schémas logistiques mis en œuvre entre les cent premiers fournisseurs communs et deux grands distributeurs français, les flux résultants de l'approvisionnement des plateformes de la grande distribution depuis les usines ou les centres de distribution des industriels sont schématisés dans la Figure 10. Cette organisation actuelle présente des sources d'inefficience dues principalement à l'indépendance des prestations logistiques actuellement dédiées.

L'idée de l'interconnexion des réseaux est d'améliorer l'efficacité de ces schémas logistiques en dépassant la fragmentation actuellement constatée. La Figure 12 souligne la différence entre la topologie actuelle des chaînes d'approvisionnement (schéma de gauche) et celle correspondant à une interconnexion des réseaux logistiques (schéma de droite), pour le même volume de flux expédiés. Si l'on considère que les différents centres logistiques (usines, entrepôts, centres de distributions, etc.) sont connectés grâce à un réseau ouvert, on voit que l'on aboutit à un réseau moins complexe et donc à des flux plus faciles à optimiser.

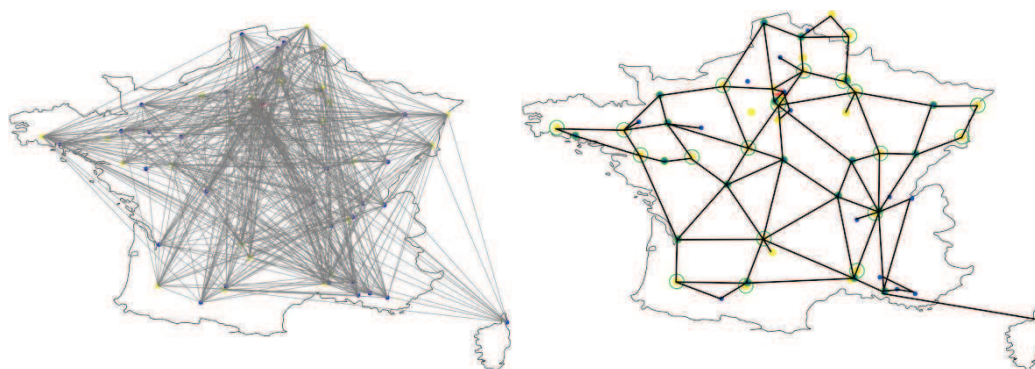


Figure 12: Superposition des flux dans les chaînes d'approvisionnement actuelles vs. un réseau de plates-formes en fonction dans une logique d'interconnexion.

Ce changement d'organisation logistique aura un impact sur les besoins en matière de transport, la diversité des modes de transports, les moyens de stockage, et plus généralement sur les performances des chaînes d'approvisionnement.

Nous montrerons dans cette thèse que la concentration des flux générée par ce type d'organisation permet d'atteindre un nouveau niveau d'efficacité et de durabilité avec une réduction des tonnes.km et une réduction des trajets à vide, ainsi qu'une meilleure utilisation des moyens de transport, et un transfert des flux vers des moyens de transport plus efficaces d'un point de vue environnemental.

Le Partenariat Public Privé Green Cars Initiative (Initiative 2010) a construit une cartographie des actions à mener suivant trois axes appelés à se rejoindre pour dépasser les antagonismes actuels, voir Figure 13. Cette cartographie s'articule autour de trois domaines : les villes, les corridors et les hubs verts, ainsi que les systèmes intelligents. Il est à noter que ces trois axes convergent vers l'interopérabilité intégrale des opérations logistiques, ce qui rejoint bien la notion proposée d'un réseau interconnecté de prestations logistiques global et ouvert.

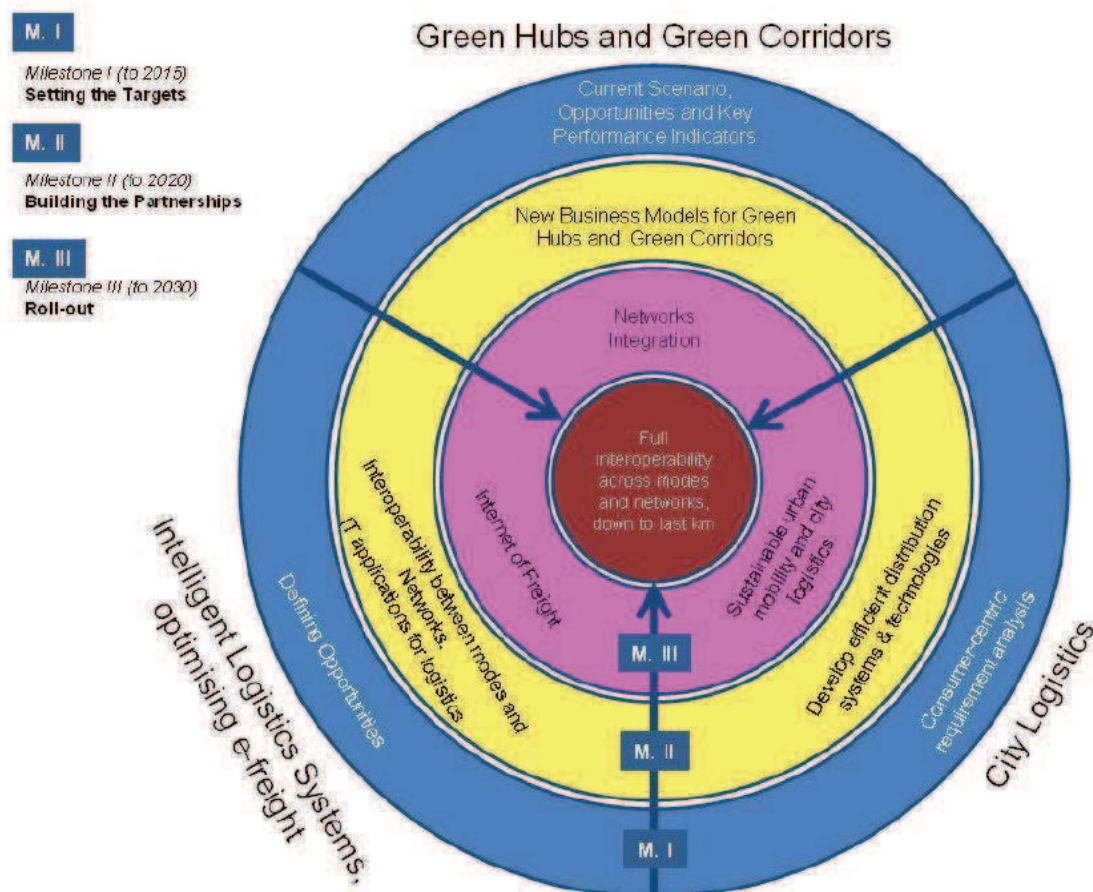


Figure 13: European Green Cars Initiative - road-map et stratégie à long terme (Initiative 2010).

2.3.3.2 Interconnexion des réseaux: Performances attendues

Une première estimation de la performance d'un réseau interconnecté par rapport à l'organisation actuelle a été réalisée par une méthode analytique simplifiée avec la méthode des approximations continues. Ce travail repose sur une approche très stylisée et simplifiée. Il part d'un exemple de réseaux de prestations logistiques indépendantes, génère des flux entre

différents nœuds, et calcule les différents coûts et les tonnes-km en fonction des distances parcourues. Ensuite, pour ce même réseau, il suffit d'interconnecter les différents nœuds créant ainsi plus de chemins logistiques, pour ensuite calculer de la même manière les coûts induits ainsi les tonnes-km. La Figure 14 représente le cas étudié avec un espace géographique composé de sept régions hexagonales et différents nœuds logistiques (cf. (Sarraj et al. 2012b) pour plus de précision).

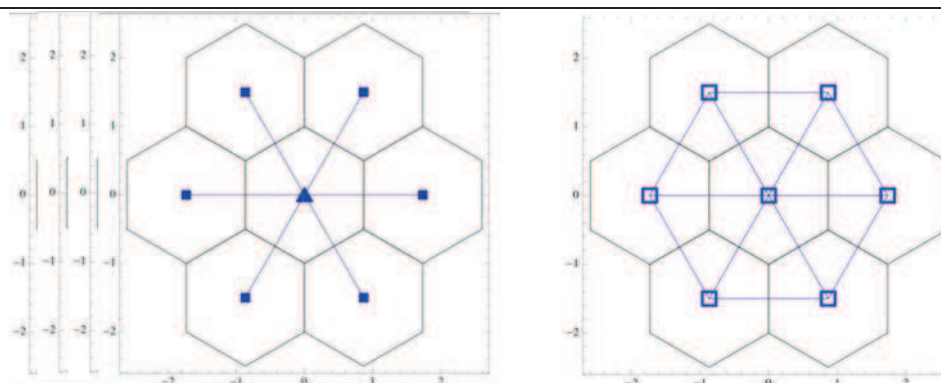


Figure 14: Un réseau de prestations logistiques indépendantes et superposées (n fois) à gauche, par opposition à un unique réseau interconnecté à droite (Sarraj et al. 2012b).

Ce travail montre des résultats très encourageants avec une réduction de coût entre 33% et 50% et une réduction en t.km de l'ordre de 22%. L'approche utilisée est beaucoup moins précise que des modèles de simulation ou d'optimisation détaillés mais elle a l'avantage de donner assez rapidement un aperçu du niveau des performances que l'on pourrait atteindre.

Mais une étude plus approfondie, basée sur des méthodes plus précises que la méthodologie analytique précédemment utilisée, est nécessaire pour pouvoir conclure sur le niveau de potentialité d'un tel concept et en avoir une analyse plus fine.

Même si l'Internet Physique (PI) repose nécessairement sur ce concept de réseau interconnectant différents réseaux logistiques actuellement indépendants, il introduit aussi d'autres éléments qui peuvent améliorer les résultats attendus, telle que la standardisation des modes de conditionnements (la conteneurisation). C'est pourquoi, l'ensemble des éléments caractérisant ce concept d'Internet Physique fait l'objet du prochain paragraphe.

2.3.3.3 Proposition d'un nouveau concept : l'Internet Physique

L'Internet physique (PI) est une nouvelle façon d'envisager le problème de consolidation et les questions connexes en matière de logistique. Cette approche vise à interconnecter les réseaux logistiques d'une manière universelle comme l'a fait Internet avec les réseaux informatiques (Montreuil 2009, Sarraj et al. 2013). L'idée consiste à router les marchandises qui seront encapsulées dans des conteneurs modulaires à travers un réseau interconnecté et ouvert, comme cela est fait avec les paquets de données qui transitent dans les réseaux de l'Internet.

(Ballot et al. 2011) décrivent l'Internet Physique comme un concept qui « *is based on the idea that logistics, which relies on closed service networks using heterogeneous means, should be rethought as a system in which, like in the Internet, networks can be seamlessly interconnected through a common operating framework enabling the easy, efficient, robust, safe and secure travel and storage of goods through a variety of means, carriers and facilities across the world as well as within a city. As in the digital Internet with the TCP/IP protocol, it should be possible to progressively integrate dedicated logistic networks into a universally interconnected system. Within the Physical Internet (PI or π) framework, goods are unitized as contents of standard, smart, green containers of multiple modular dimensions. As digital Internet packets, the π -containers are routed according to their π -address from their origin to their destination using the most efficient combination of shared transport, storage and handling means. Through the development of protocols and π -container standards, the aim is to gradually replace a fragmented constraining organization by an open distributed organization. As such, maritime and multimodal container shipping can be seen as a premise, where various goods (food, frozen products, chemicals...) are in individual containers which share the same ship. Since in a Physical Internet goods will be encapsulated in containers, this will require extensions of the contract-and-insurance practices, such as Incoterm, that are in use in international trade. We make the assumption that the current organization used at "sea" could be deployed and extended for "land" logistics. A deployment towards a Physical Internet will inevitably lead to a deep reorganization of logistics and its means. It will also have a definite impact on the way our most common goods will be designed and distributed up to our doors.* »

L'Internet Physique se veut donc un concept inspiré par le succès d'Internet dans le domaine des réseaux informatiques mais adapté aux besoins de la logistique. En particulier comme sa

définition le montre, il s'agit de trouver la traduction dans le domaine de la logistique de l'élément clé d'Internet à savoir l'interconnexion universelle des réseaux. En effet, avant la création de l'Internet, il y avait uniquement des réseaux informatiques locaux et dédiés et l'idée d'Internet était d'interconnecter ces différents réseaux en y implémentant d'autres structures tels que des routeurs, afin de permettre une connexion intelligente. En plus, pour la création du réseau Internet il a fallu créer des protocoles standardisés (les protocoles TCP/IP) permettant de fixer des règles assurant son bon fonctionnement et créant ainsi un langage commun (Stevens 1993). C'est dans ce contexte que l'Internet Physique, viendrait interconnecter des réseaux déjà existants en implémentant éventuellement d'autres infrastructures et en établissant des protocoles garantissant sa fiabilité.

Au lieu des réseaux d'approvisionnement dédiés et fragmentés, ce concept permet de développer un réseau mondial maillé, comme le montre la Figure 15 (Montreuil 2009, Sarraj et al. 2013). Dans un tel réseau, chaque fournisseur, représenté par un carré, expédie directement les marchandises vers la destination finale, représentée par un cercle, sans avoir des points de passage obligés. Sur le côté gauche de la Figure 15, représentant les réseaux d'approvisionnement classiques, les produits sont palettisés puis expédiés directement de l'usine d'un fabricant à l'un de ses entrepôts, puis à l'un des centres de distribution des clients. Sur le côté droit de la Figure 15, représentant un réseau interconnecté, les produits sont conteneurisés et chaque conteneur ainsi rempli sera chargé à l'usine et expédié à sa destination cible via des transits par des hubs du réseau ouvert. C'est ainsi que l'une des conséquences de cette transition vers un réseau interconnecté correspond à la variation implicite de la topologie des réseaux de prestations logistiques.

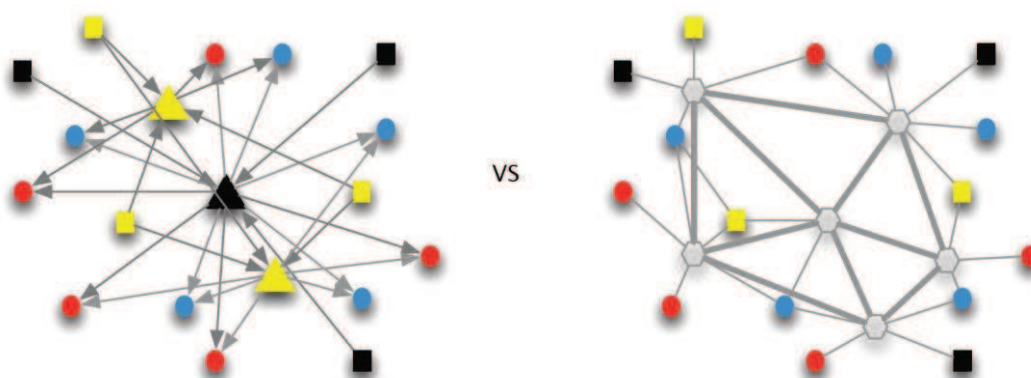


Figure 15: Réseaux qui se chevauchent vs réseau interconnecté

Notre travail de recherche se situe dans le cadre d'une interconnexion des réseaux logistiques, ce qui rejoint le principe même de l'Internet Physique. Un déploiement vers un tel système conduira inévitablement à une profonde réorganisation de la logistique et de ses moyens. En effet, le fait qu'un système permette d'expédier de petites quantités, ce qui devrait être le cas de PI vu que l'on ne cherchera plus à remplir les camions avec des flux provenant d'une même source, avec la même efficacité que celle de volumes plus importants, conduirait à une remise en cause des réseaux de distribution en étoile pour privilégier des livraisons plus directes aux clients avec moins de détours (Figure 15). Ce système peut donc prétendre à avoir un certain impact (par la conteneurisation par exemple) sur la façon dont les produits de consommation courante seront distribués voire conçus.

Ce concept peut apparaître comme futuriste ou fort éloigné de la réalité actuelle de la logistique terrestre. Pourtant, cette approche s'inscrit dans une logique qui a débutée avec le fret maritime conteneurisé (Levinson 2008) et des transformations induites par les potentialités offertes de la conteneurisation. Cette dernière se décline même aujourd'hui dans le système de livraison de boîtes de repas à Bombay opéré par Dabbawala et qui souligne l'intérêt d'adapter cette démarche de conteneurisation dans un autre secteur d'activité (Bondre 2011). Par ailleurs, un certain nombre de travaux de recherche portent sur le fret intelligent : Euridice, efreight (Paganelli et al. 2009, Schumacher et al. 2011) ou la conteneurisation avec mega swap boxes (UNIZA 2008) mais sans que le lien ne soit encore fait entre eux.

2.4 Terrain d'étude : la grande distribution

Nous avons choisi comme terrain d'étude, les chaînes ou réseaux logistiques de la grande distribution en France. En effet, la grande distribution a l'avantage d'être implantée sur l'ensemble du territoire national et cela d'une manière assez bien répartie. La Figure 16 souligne ce point en présentant la répartition des centres de distributions de deux grands distributeurs français et de leurs plus grands fournisseurs (les 100 premiers fournisseurs communs en produits d'épicerie, liquides et de Droguerie Parfumerie Hygiène).

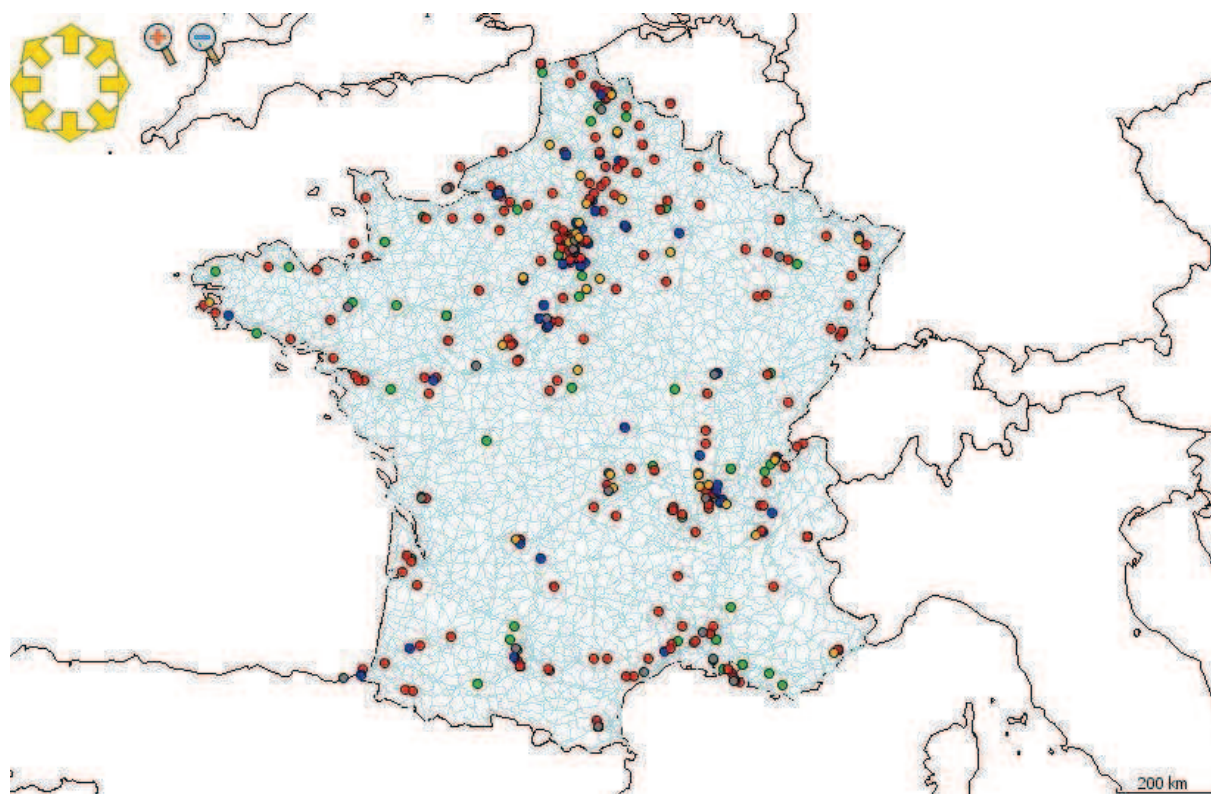


Figure 16: Exemple de réparation des nœuds logistiques dans la grande distribution (site logistique routier en jaune, multimodal en gris, centre de distribution en vert, entrepôt en bleu, usine en rouge)

Il est à noter que cette figure ne présente que les points logistiques qui opèrent la distribution amont des produits des trois catégories ci-dessus mentionnées entre deux distributeurs et leurs cent premiers fournisseurs en commun. L'extrapolation à l'ensemble de la grande distribution française laisse augurer d'un réseau encore bien plus vaste. En effet, en considérant la partie aval de la chaîne, la Figure 17 illustre un exemple de cartographie des points de ventes du groupe U et de Aldi.

Ainsi la grande distribution fait intervenir un grand nombre d'acteurs vu la multiplicité des produits qui sont proposés au consommateur final. Ce qui se traduit par une multiplicité des chaînes logistiques sur le territoire. De plus, les fournisseurs de la grande distribution peuvent être aussi bien de grands industriels de la grande consommation que des PME. Le secteur français de la grande distribution est l'un des plus compétitifs d'Europe. Selon le panorama de branche 2009 publié par la (FCD²), Fédération du commerce et de la distribution, ce secteur a généré un chiffre d'affaires annuel de 205 milliards d'euros. Par ailleurs, Il emploie plus de

²Fédération des Entreprises du Commerce et de la Distribution :<http://www.fcd.asso.fr>

741 300 personnes (Sétra 2008a). En France, les six plus grands distributeurs représentent à eux seuls 90 % du marché de la grande consommation. Il s'agit plus précisément de Carrefour (leader Européen), Auchan, Leclerc, Casino, Intermarché (Groupement des Mousquetaires) et Système U (Tarteret et al. 2012). De plus, en 2007, le secteur de la grande distribution en France a enregistré 26851 points de ventes avec 1 526 hypermarchés, 5 501 supermarchés, 4 223 maxi discomptes et 15 601 magasins de proximité (Frans 2013). Le nombre de points de ventes a atteint 331 000 en 2009 (INSEE).

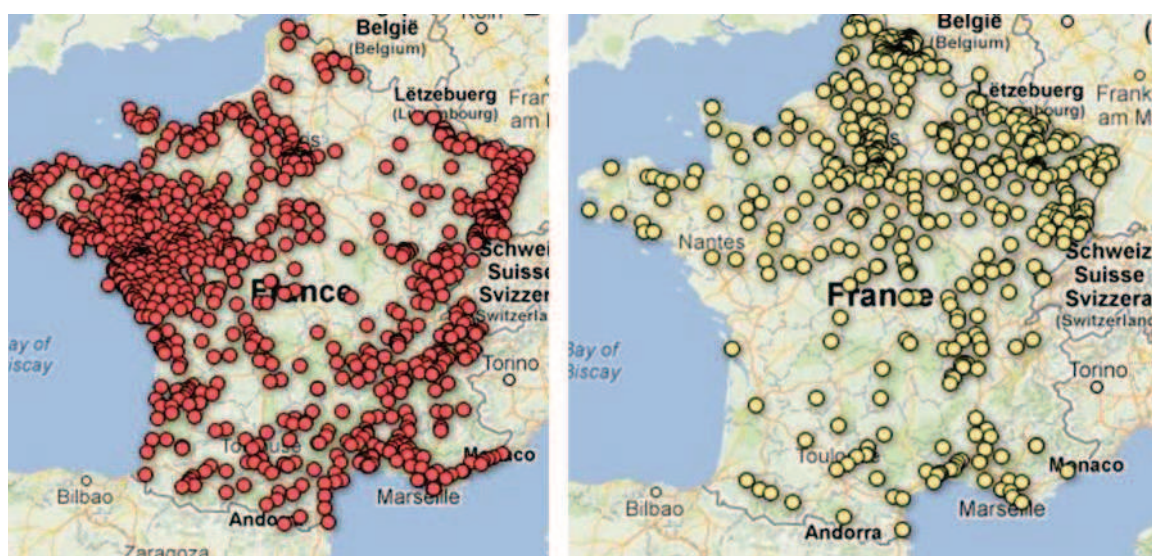


Figure 17: Répartition des magasins U (à gauche) et Aldi (à droite)³

La grande distribution a connu beaucoup de développement avec l'augmentation du nombre d'acteurs. Cette augmentation de concerne pas uniquement les points de ventes mais aussi les nombreux fournisseurs qui diffèrent de par leurs activités et leur taille. Leur nombre se traduit par l'assortiment toujours en croissance dans les linéaires des points de vente. Aujourd'hui l'organisation de la grande distribution est résumée par la Figure 18.

Par ailleurs, on peut noter dans cette figure que le secteur de la grande distribution est segmenté en alimentaire (ex. Carrefour, Auchan) et le non-alimentaire (ex. BHV, Galeries Lafayette). Dans notre cas, nous nous intéressons à la grande distribution alimentaire qui représente près de 70% du CA total (INSEE, Commerce de Détail, 2004) de la grande distribution et pèse de plus de 65% en termes d'emplois avec 500 000 salariés en 2008 (Sétra 2008a). L'alimentaire représente en France 11000 magasins avec 19 millions de m² de

³ Site web - entreprise - Data Publica: <http://www.data-publica.com/content/2012/09/quelle-repartition-territoriale-pour-la-grande-distribution-en-france/>

surfaces de vente (Sétra 2008a). De plus, l'alimentaire est aujourd'hui le marché le plus développé et dont les chaînes logistiques sont les plus complexes (Sétra 2008a).

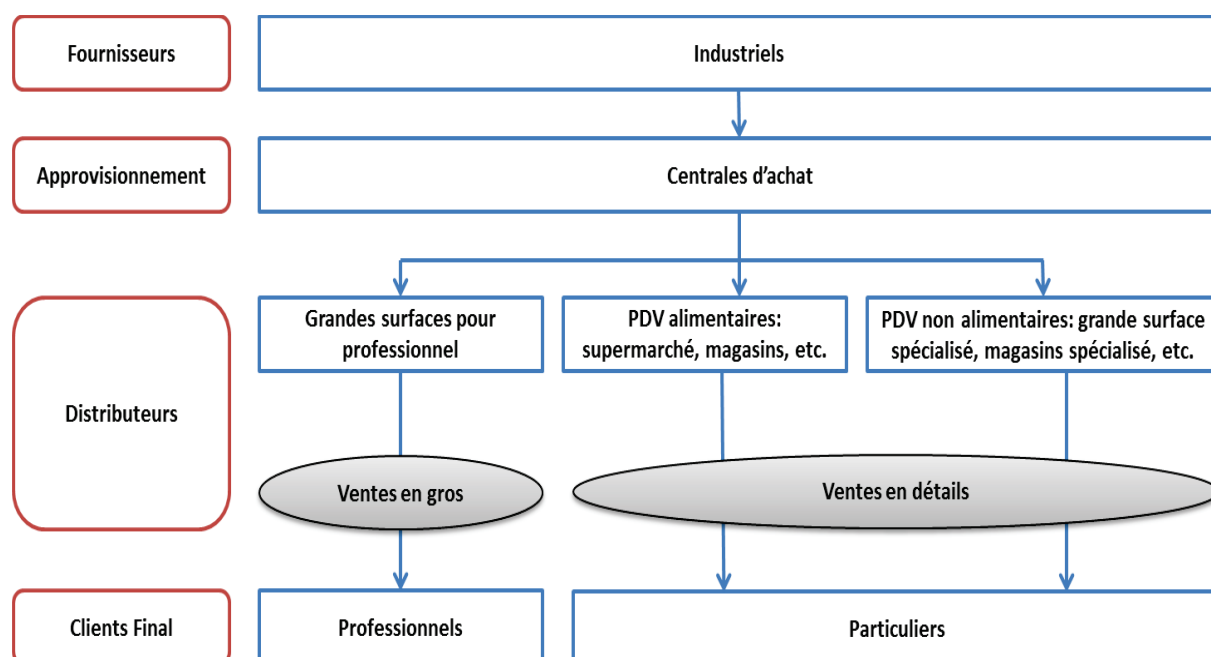


Figure 18: Organisation du secteur de la grande distribution

La majorité des sites logistiques de la grande distribution alimentaire se trouve sur le territoire national. Le schéma logistique le plus général, peut se résumer en quatre étapes (en termes de flux) :

- Les usines livrent leurs produits finis aux entrepôts (les usines n'ayant normalement pas ou peu de stock).
- Les entrepôts reçoivent donc des produits de différentes usines, et les stockent. Ils réalisent ensuite des groupements de ces produits pour livrer les commandes clients aux centres de distribution. Un fournisseur possède généralement peu d'entrepôts qui peuvent être gérés par des prestataires externes.
- Les centres de distributions appartiennent à des grands distributeurs qui en possèdent généralement plusieurs, afin de mieux servir leurs différents points de ventes situés partout dans le territoire. On parle généralement d'entrepôts régionaux. Ils peuvent être gérés par des prestataires externes également.

Ce schéma de distribution n'est pas le seul existant mais il est prépondérant. En effet, ce mode de distribution dit à « circuit long », par opposition au « circuit court » où les produits partent

directement des entrepôts vers les magasins, représentait en 2008, 75% des flux de l'alimentaire, contre 25% en « circuit court ».

2.5 Conclusion

Nous avons vu, dans ce chapitre, l'antagonisme croissant entre les performances actuelles du transport de marchandises et les attentes futures auquel il devra faire face. De ce fait, il apparaît comme nécessaire de développer un système logistique plus efficace, capable de répondre à l'augmentation prévue des flux transportés sans remettre en cause les objectifs de la Commission Européenne (réduction des émissions en CO₂).

Comme nous l'avons souligné la consolidation des flux représente un moyen pour améliorer la performance du système logistique actuel, comme le montrent plusieurs travaux de recherche. C'est pourquoi, au niveau de la conception et de l'organisation des chaînes logistiques, nous proposons d'opter pour une globalisation du concept de mutualisation, à savoir une interconnexion des réseaux logistiques actuellement dédiés, créant ainsi un réseau de réseaux. L'idée la plus élaborée dans ce sens est le concept de l'Internet Physique, en tant que métaphore de l'Internet. Nous avons donc choisi de situer notre recherche dans ce cadre, participant ainsi à la création et à la définition de ce concept qui reste encore aujourd'hui une notion générale dont les composantes restent à développer.

La mise en œuvre d'une telle organisation, interconnectant différents réseaux de prestations logistiques, nécessite des études approfondies concernant la structure du réseau et la manière avec laquelle l'interconnexion s'établira, concernant la définition des différents acteurs ainsi que leurs rôles, les protocoles permettant le bon routage des marchandises, la forme sous laquelle seront conditionnés les produits (la conteneurisation), les protocoles assurant la communication des différentes entités (ex : systèmes d'informations), etc.

Cette thèse qui s'inscrit dans la perspective d'une amélioration de la performance de la chaîne logistique, se concentre sur l'aspect du routage de la marchandise, ce qui permettra de définir des protocoles qui régiront le transit de la marchandise dans PI pour ensuite pouvoir évaluer son ou ses potentiels.

C'est ainsi que notre premier objectif, sera de définir les dimensions physiques et organisationnelles nécessaires à l'interconnexion de réseaux logistiques. Dans notre

méthodologie de recherche nous sommes restés fidèles au principe même de création de l'Internet Physique, à savoir une analogie avec l'Internet Digital. Nous nous sommes donc inspirés des réseaux informatiques tout en analysant les besoins spécifiques du transport de marchandises dans notre contexte (la grande distribution). Ceci n'empêche pas, si nécessaire, d'étudier des méthodologies employées dans des domaines autres que celui de l'informatique. Ce premier objectif sera l'objet des chapitres 3 et 4.

Le chapitre 4 est à cet effet consacré à l'étude des règles de routage (acheminement des flux) via les différents réseaux interconnectés, élément que nous avons choisi d'approfondir.

Le second objectif de ce mémoire est dédié à l'étude de la potentialité d'un réseau PI dans lequel on aurait implémenté les protocoles développés. Ainsi, nous avons choisi de recourir à la simulation de différents PI-scénarios et d'analyser les résultats obtenus. La simulation nécessite de définir très précisément des protocoles tels que les algorithmes choisis pour le remplissage des moyens de transport ou encore ceux permettant de trouver les plus courts ou plus rapides chemins.

Ainsi, dans les chapitres 3 et 4 on proposera des principes et des règles de fonctionnement dans un réseau PI et particulièrement la question du routage, en se basant initialement sur ce qui a été fait pour la création de l'Internet. Puis le chapitre 5 sera consacré aux protocoles nécessaires à la simulation. Enfin, nous présenterons dans le chapitre 6 le modèle de simulation, les données utilisées, les scénarios testés (avec différentes variantes telles que l'utilisation ou non du train ou encore la remise en cause des passages obligés des flux par les entrepôts), les résultats obtenus et leurs analyses.

L'ensemble de ces chapitres sera développé dans le cadre de notre terrain d'étude, la grande distribution.

Chapitre 3 : Les dimensions physiques et organisationnelles des réseaux logistiques

3.1	Caractéristiques physiques et organisationnelles des réseaux à interconnecter	60
3.1.1	Réseaux logistiques : Une hétérogénéité à plusieurs niveaux	60
3.1.2	Un socle en commun nécessaire pour interconnecter les réseaux logistiques terrestres	69
3.2	Concepts et problématiques physiques et organisationnelles associées à l'interconnexion des réseaux logistiques.....	72
3.2.1	Le parallèle entre l'informatique et la logistique	72
3.2.2	Problématiques associées à l'interconnexion des réseaux informatiques.....	74
3.2.3	L'interconnexion des réseaux logistiques : Eléments clefs	76
3.3	La conteneurisation	78
3.3.1	L'intérêt de la conteneurisation.....	78
3.3.2	La conteneurisation : Un concept déjà développé dans le transport maritime	80
3.3.3	Les conteneurs de l'Internet Physique	81
3.4	Topologie du réseau formé par les réseaux interconnectés.....	83
3.4.1	Connexion entre réseaux et transit des flux	83
3.4.2	Topologie du réseau des réseaux.....	90
3.5	Echange de flux entre opérateurs.....	96
3.5.1	Les échanges de flux d'informations entre opérateurs de l'Internet	96
3.5.2	Les échanges de flux d'informations au sein d'un opérateur de l'Internet	97
3.5.3	Les échanges de flux dans Internet Physique	98
3.6	Le Routage : détermination du meilleur chemin dans un réseau	100
3.7	Conclusion	101

Chapitre 3. Les dimensions physiques et organisationnelles de l'interconnexion des réseaux logistiques

Ce chapitre s'inscrit dans la perspective d'une contribution à la définition des concepts nécessaires à l'interconnexion des réseaux de prestations logistiques, et en particulier l'Internet Physique. A ce titre, une introduction des concepts fondateurs de l'IP a été proposée dans (Theodor et al. 2013), et ce travail en constitue une extension avec une analyse plus fine et ciblée sur les dimensions physiques et organisationnelles de l'interconnexion.

Dans ce chapitre, on proposera donc des concepts pour la construction d'un réseau logistique interconnecté et l'acheminement de la marchandise de façon à massifier au maximum les flux, à réduire les émissions en CO₂ tout en augmentant les taux de services.

Pour construire un tel système, il faut tout d'abord définir les réseaux à interconnecter, analyser leurs points communs et leurs différences qui pourraient complexifier leurs interconnexion. Ensuite, des solutions devront être apportées afin de pallier aux problèmes posés.

La première partie définira les caractéristiques physiques et organisationnelles des réseaux logistiques. Ce qui permettra ensuite d'analyser les éléments clefs de leurs interconnexions. Puis, dans une troisième partie, on abordera le premier élément clef de PI, à savoir la conteneurisation. Les notions relatives à la topologie du réseau résultant seront ensuite développées, puis nous identifierons les impacts de l'interconnexion de réseaux sur les modèles d'affaires des prestataires logistiques. Un dernier élément, qui concerne l'acheminement des conteneurs au sein du réseau interconnecté, fera l'objet d'un chapitre à part entière (chapitre 4).

La définition des dimensions physiques et organisationnelles de l'interconnexion des réseaux logistiques, sera traitée en partant des concepts fondateurs de l'Internet Digital suivi de transpositions et d'adaptations au contexte de la logistique.

Nous nous plaçons dans le cadre de la grande distribution même si les concepts que l'on développe dans cette thèse peuvent être adaptés à d'autres types de réseaux logistiques issus d'autres secteurs d'activités.

3.1 Caractéristiques physiques et organisationnelles des réseaux à interconnecter

Ce chapitre définit les dimensions physiques et organisationnelles qui vont permettre d'interconnecter des réseaux logistiques actuellement dédiés. Pour ceci, il est impératif, en premier lieu, d'analyser les spécificités et les composantes de ces réseaux afin d'identifier les principales problématiques qui se posent lors d'une interconnexion.

Nous allons donc dans un premier temps identifier et analyser les caractéristiques des réseaux de prestations logistiques avant d'établir le socle commun nécessaire pour les interconnecter.

3.1.1 Réseaux logistiques : Une hétérogénéité à plusieurs niveaux

La Figure 19 donne un exemple de structure des flux entre les acteurs de la chaîne logistique de la grande distribution. La Figure 20 montre, quant à elle, le parcours depuis l'usine de production jusqu'au consommateur final d'une unité consommateur, qui sera mouvementée dans cette chaîne en unités de chargement produit (ici palettes).

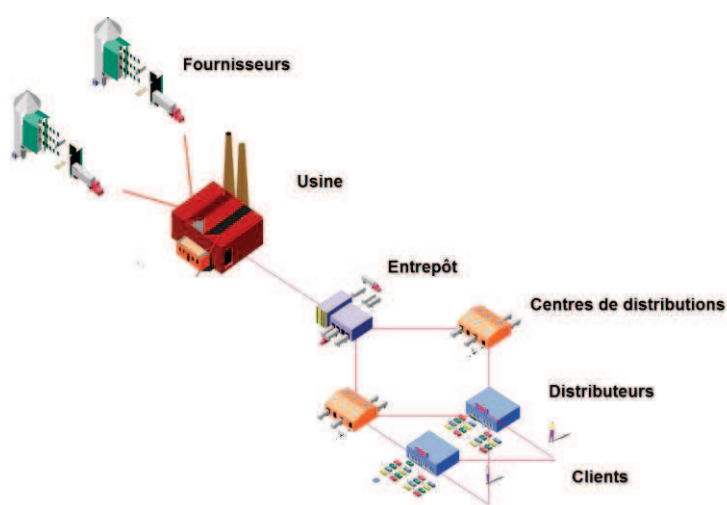


Figure 19: Exemple de structure de flux entre acteurs de la chaîne logistique

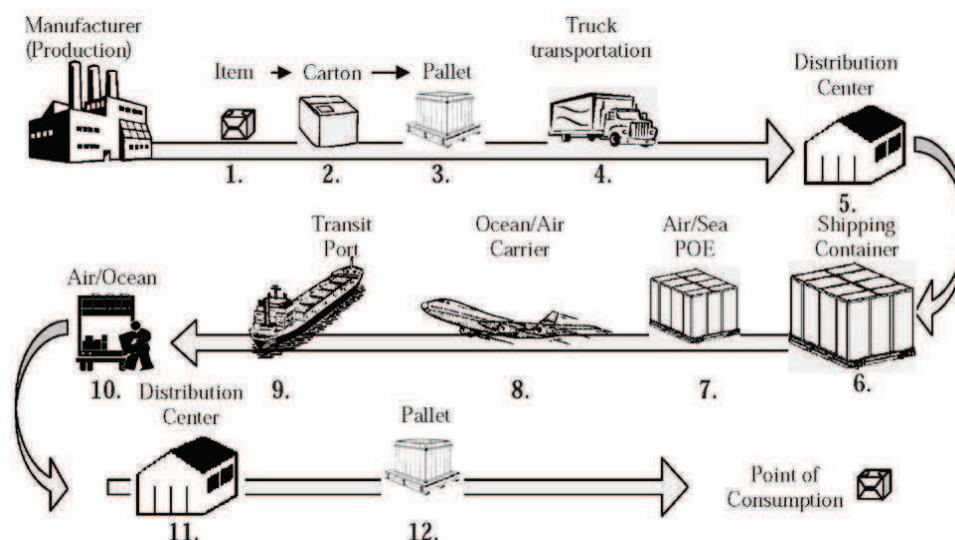


Figure 20: Parcours de la marchandise depuis l'usine au consommateur final⁴

En analysant ces deux schémas, on peut remarquer qu'un réseau de transport logistique peut être caractérisé par quatre critères à savoir :

- La typologie du réseau
- Le mode de transport
- Les modes de conditionnement ou les unités de chargement
- Les contenus (les marchandises proprement dites)

Ces critères créent donc quatre niveaux d'hétérogénéité entre les réseaux de transport. Analysons chacun de ces critères.

Un réseau de transport peut avoir des typologies différentes (Figure 21). On a vu en effet, dans le chapitre 2, le concept de Hub-and-Spoke qui représente une typologie en étoile et les tournées de véhicules qui sont un réseau en anneau. D'autre part, le réseau logistique du point de vue d'un distributeur de la grande distribution présente une topologie arborescente (Figure 22).

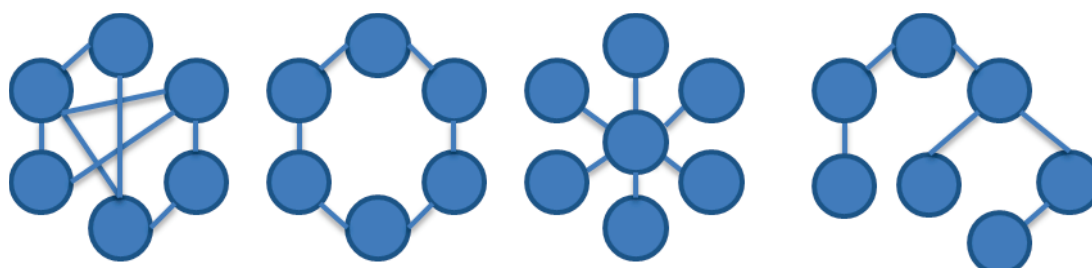


Figure 21: Des topologies différentes pour les réseaux logistiques

⁴ Source : <http://what-when-how.com/>

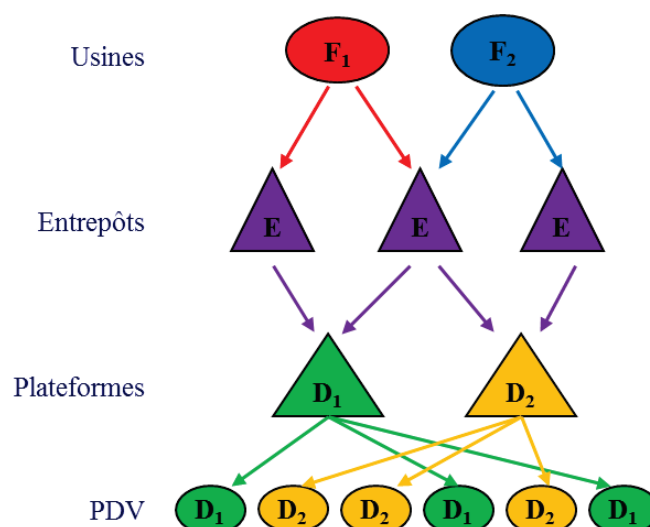


Figure 22: Exemple simple d'un réseau logistique du point de vue d'un distributeur (Grande distribution)

Si nous ne considérons pas spécifiquement le secteur de la grande distribution, nous devons aussi retenir que l'activité de transport offre de la diversité au niveau des modes qu'elle utilise. On distingue, en effet, le transport routier, le transport maritime, fluvial et aérien. Pour chacun de ces modes de transport, est associé un réseau particulier avec des règles de fonctionnement spécifiques. Ainsi, à titre d'exemple, rien qu'au niveau du transport maritime, il existe une segmentation au niveau des matières transportées (conteneurs, matières premières, matières agricoles, pétrole), conduisant à des organisations et des moyens différents soumis à des législations spécifiques (Chevalier et al. 2004).

Ces différents types de réseaux communiquent pour s'échanger des flux via des plateformes multimodales tels que les grands ports, les aéroports ou les gares ferroviaires. De plus, pour chacun de ces modes de transport, il n'y a pas d'harmonisation dans les moyens utilisés. En effet, le transport routier se fait avec des camions, des semi-remorques, des petits porteurs, etc. De même, le transport ferroviaire offre une hétérogénéité au niveau des types de wagon qu'il peut mobiliser. La Figure 23 représente deux de ces types de wagon (source : SNCF).



	
Long. (m) 12.79	Long. (m) 18.5
Larg. (m) 2.76	Larg. (m) 2.4
Superficie 35.4	Superficie 50.5

Figure 23: Exemples d'hétérogénéité du parc ferroviaire - wagon E71 VS R20 (Source : SNCF)

A l'hétérogénéité des réseaux et des modes de transports, s'ajoute celle de leur contenu. On différencie dans un premier niveau le transport de marchandises en vrac et celui des marchandises unitaires. Il est évident que le transport en vrac représente des inconvénients en termes de difficultés de manutention, limitant ainsi les ruptures de charges. Ceci concerne particulièrement les matières premières (bois, sable, etc.). C'est ainsi que l'on transporte aujourd'hui moins de marchandises en vrac au profit des marchandises unitaires, appelées aussi les unités de chargements et dont les principales sont: les palettes, les conteneurs et les caisses-mobiles. Ces modes de conditionnement sont de plus en plus utilisés et principalement les palettes qui représentaient en 2005 36 % des tonnes-kilomètres effectuées par les transporteurs français. Les palettes sont aujourd'hui le mode de conditionnement de référence de la logistique, car elles sont les plus adaptées à la nouvelle stratégie de distribution basée sur la diminution de la taille des expéditions (Sétra 2008b).

On trouve aujourd'hui une grande hétérogénéité dans ces trois modes de conditionnement.

Le Tableau 3 représente la quantité de palettes produites par type en France. Nous remarquons la diversité des palettes avec des dimensions très différentes même si la tendance suit deux formats standards 800 x 1200 et 1000 x 1200, qui représentent à eux seuls plus du tiers de la production française (ces formats standards se retrouvent dans les catégories identifiées par leur type, la VMF (Verreries Mécaniques de France) et la cimenterie).

Tableau 3: Répartition de la production française selon les types de modèles 2005 – (Sétra 2008b)

Types de palettes	Quantité de palettes produites (unité)	Répartition %
1200 x 1200 mm	1 500 000	2,14
1000 x 1200 mm	8 000 000	11,43
600 x 800 mm	3 000 000	4,29
600 x 1000 mm	800 000	1,14
800 x 1200 mm (standard Europe)	7 000 000	10,00
800 x 1200 mm (autres)	9 000 000	12,86
CP (CP1 à CP9)	3 000 000	4,29
VMF	2 000 000	2,86
Papeterie	6 500 000	9,29
Fruiterie	1 500 000	2,14
Cimenterie	7 000 000	10,00
Galia	1 800 000	2,57
Autres	18 900 000	27,00
TOTAL	70 000 000	100

De plus, le Tableau 4 confirme cette hétérogénéité mais cette fois-ci au niveau mondial, avec des palettes spécifiques à chaque région.

Tableau 4: Les palettes standards dans différentes régions du monde (AFNOR 2005)

Région du monde	Palettes standards les plus utilisés
Europe Continentale	800 x 1 200 mm
Royaume Uni	1000 x 1200 mm
Amérique du Nord	1016 x 1219 mm
Amérique du Sud	1000 x 1200 mm
Asie	1100 x 1100 mm
Australie	1140 x 1140 mm

On voit donc cette grande hétérogénéité dans les dimensions des palettes utilisées aujourd'hui. Ceci touche même les standards développés dans chaque région du monde.

Pour les conteneurs maritimes la situation est moins problématique car des standardisations, cette fois-ci mondiales ont été établies du fait de la nature même de ces conteneurs destinés à des échanges inter-pays. Selon la norme ISO, il y a trois grands standards de conteneurs, ayant tous une même largeur de 8 pieds (2438,4 mm) et une hauteur de 8.5 pieds (2.591 m), mais avec des longueurs différentes (dimensions extérieures):

- Les conteneurs dits de 20 pieds (6.096 m)
- Les conteneurs dits de 30 pieds (9.068 m)
- Les conteneurs dits de 40 pieds (12.04 m)

Mise à part ces standards ISO qui touchent plutôt les conteneurs maritimes, on trouve aussi d'autres types de conteneurs, plutôt au niveau terrestre, avec des dimensions très variées (VNF 2009). A titre d'exemple, on cite les conteneurs :

- De longueur de 48 et 53 pieds, que l'on retrouve en Amérique du Nord.
- De 9 pieds (2,743 m) ou 9,5 pieds (2,896 m) de hauteur, dits des conteneurs « high cube ».
- De hauteur de 4.25 pieds, dits les conteneurs « halfheight » qui proposent une hauteur moins élevée et destinée à transporter de lourdes charges.
- D'un volume de plus de 60 m³, dits les conteneurs géants, etc.

La problématique qui se pose aujourd'hui est l'incompatibilité entre ces unités de chargements. En effet, en considérant uniquement les conteneurs standards ISO, on se rend compte qu'ils ne peuvent offrir une capacité de chargement optimal des palettes normalisées (800 x 1 200 mm). La Figure 24 représente en largeur les conteneurs normalisés, avec une dimension extérieure de 8 pieds (2.438m) et une dimension intérieure de 2.33 m. Cette largeur, comme le montre cette figure, ne suffit ni pour charger 2 palettes (800 x 1 200 mm) dans le sens de longueur ($2.33\text{m} < 2 \times 1.2 \text{ m}$), ni pour charger 3 palettes dans le sens de la largeur ($2.33 \text{ m} < 3 \times 0.8 \text{ m}$). De même, cette largeur n'est pas optimale si on charge une palette dans le sens de la largeur et une autre dans le sens de la longueur. Dans tous les cas, le chargement ne pourra pas être optimal.

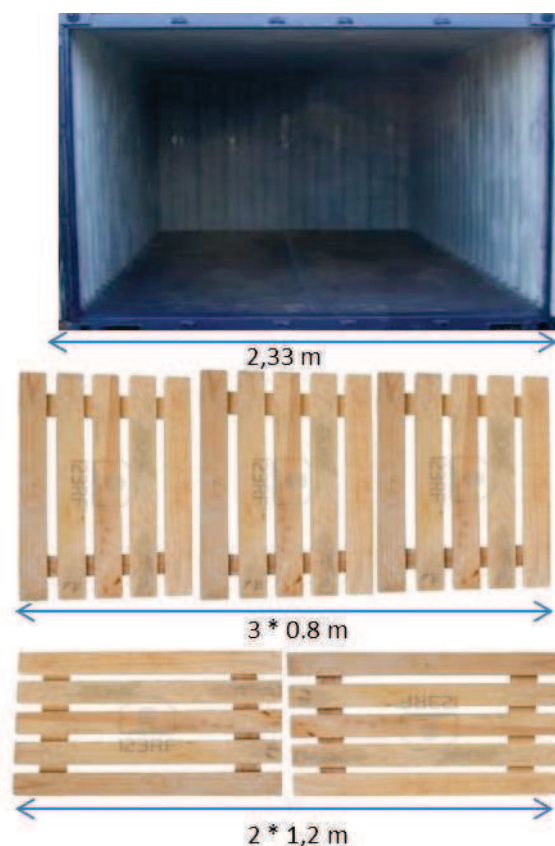


Figure 24: Un conteneur de 8 pieds ne suffit pas pour charger 2 palettes (800 x 1 200 mm) dans le sens de longueur, ni pour charger 3 palettes dans le sens de la largeur

On voit donc cette incompatibilité entre les dimensions des palettes et celles des conteneurs normalisés vu la perte d'optimalité en chargement. A cela s'ajoute l'inadaptation des longueurs et hauteurs de ces conteneurs maritimes à ceux des modes de transport routier. Si nous considérons les dimensions des semi-remorques (la majorité des transports intra-européens étant réalisés en camion et principalement en semi-remorque (Bouley 2010)) et celles des conteneurs, nous observerons une perte d'espace de chargement systématique. Nous avons trois longueurs possibles dans les conteneurs maritimes normalisés: 20 pieds (6.096 m), 30 pieds (9.068 m) et 40 pieds (12.04 m). Les semi-remorques les plus utilisés en Europe ont un espace de chargement possible d'une longueur de 13.2 m (Académie de Lyon⁵). Ainsi, comme le montre la Figure 25, le meilleur chargement possible en longueur se fait via 2 conteneurs de 20 pieds. De même, on note une perte systématique en hauteur.

⁵ <http://www2.ac-lyon.fr>

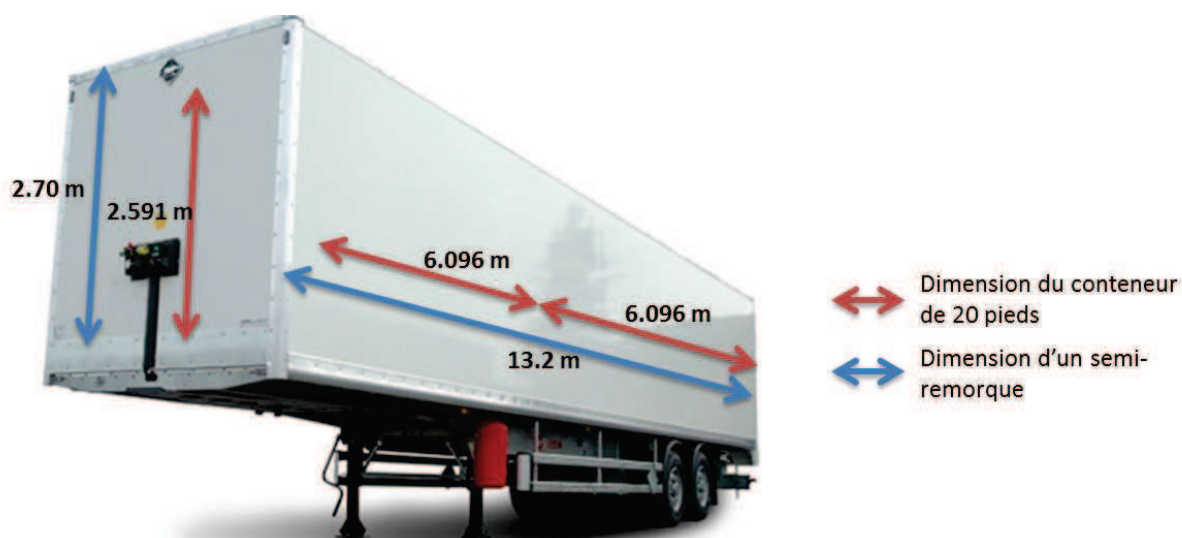


Figure 25: Meilleur chargement possible de conteneurs maritimes par rapport aux dimensions d'une semi-remorque Européenne (dimensions utiles intérieures pour la semi-remorque⁶ et dimensions extérieures pour les conteneurs)

Les palettes européennes ne sont donc pas adaptées aux conteneurs. De même les conteneurs ne sont pas adaptés aux semi-remorques. C'est ainsi que la réussite qu'a connu les conteneurs maritimes avec plus de 200 millions de mouvements annuels (Levinson 2008), n'a pas pu être transposé dans le transport terrestre européen. Ce qui a donné place à l'utilisation des caisses mobiles et dont les dimensions permettent de maximiser (en longueur et largeur) la charge utile transportée de ce type de palette. Les caisses mobiles sont un autre type de conteneurs qui ont la particularité de ne pas pouvoir être empilés sur plusieurs niveaux en hauteur (non gerbable). Les caisses mobiles sont de plus en plus utilisées dans le transport terrestre avec une utilisation européenne qui a triplé entre 1991 et 2002. La Figure 26 montre à ce titre l'évolution de l'utilisation des caisses mobiles en Europe⁷ (AFNOR 2005).

Cependant, le caractère non gerbable des caisses mobiles a empêché leur utilisation dans le transport maritime. Il est en effet inconcevable que le transport maritime puisse transporter un chargement sur une seule hauteur. De plus, les caisses sont constituées par une base métallique solide mais avec un habillage non renforcé qui empêche toute manutention par les porte-conteneurs maritimes.

⁶ Les dimensions utiles sont données par un loueur de semi-remorques : <http://www.semi-remorques-lrt.fr/>

⁷ Ces données nécessitent certainement une mise à jour, mais elles sont données ici à titre indicatif vu la difficulté de trouver de telles informations.

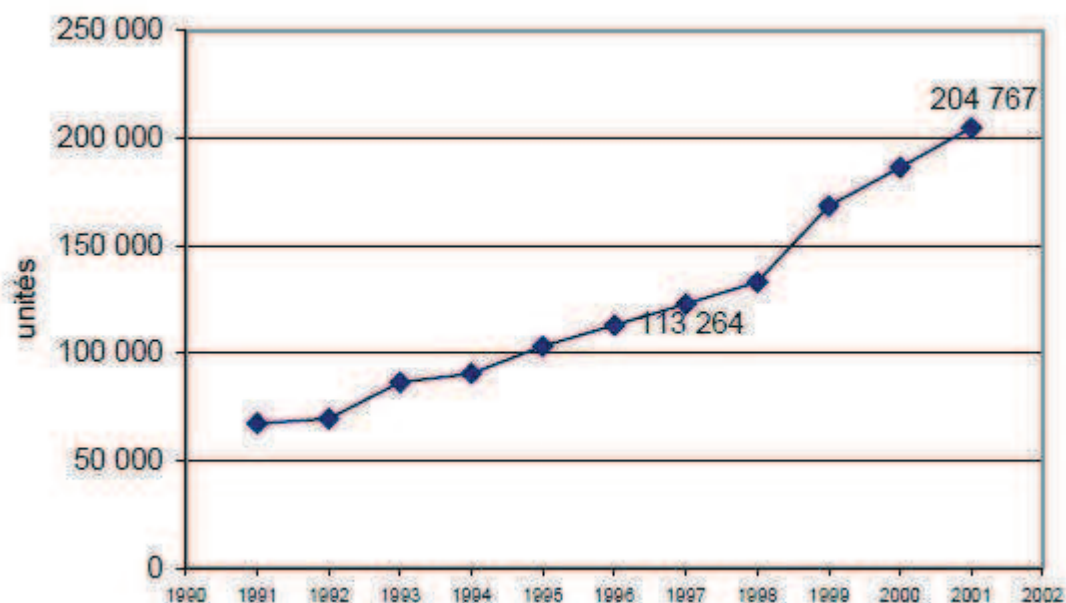


Figure 26: Evolution de la flotte européenne de caisses mobiles

On remarque donc l'absence d'une unité de chargement intermodale garantissant une optimalité de chargement des moyens de transport et l'absence d'une adaptation entre les différents modes de conditionnement (palettes, conteneurs, caisses mobiles). Nous mentionnons également que cette comparaison dans les dimensions a été réalisée en considérant uniquement les palettes et les conteneurs normalisés. Ce qui implique que ce niveau d'incompatibilité est en réalité plus flagrant vu l'hétérogénéité et la multiplicité des modes de transport et de conditionnements que l'on retrouve aujourd'hui. Ceci souligne encore plus les problèmes qui se poseront lors de l'interconnexion des réseaux logistiques car on se retrouvera devant des unités de chargement hétérogènes et non adaptées aux moyens de transport, diminuant ainsi les taux de chargement. De plus, cette hétérogénéité entre les modes de conditionnement pose des problématiques au niveau de la manutention et du stockage car les équipements ne sont pas adaptés pour tous.

Le quatrième niveau d'hétérogénéité concerne les marchandises proprement dites, qui peuvent être sous formes de cartons, de pacs ou de produit emballés avec des dimensions et formes différentes. Ce niveau d'hétérogénéité est aujourd'hui « caché » par les unités de chargement qui ont remplacés le transport en vrac.

Nous n'avons mentionné ici que les niveaux d'hétérogénéité que nous trouvons intéressants dans le cadre de notre recherche. Il y a en effet, d'autres niveaux d'hétérogénéité comme le mode de fonctionnement propre à chaque type de nœud logistique (plateforme, entrepôt, hub,

usine, centre de distribution, etc.), les différents acteurs intervenant dans les réseaux logistiques, les textes juridiques régissant le fonctionnement de chaque mode de transport,... L'hétérogénéité entre les réseaux logistiques fait que l'interconnexion de ces services est difficilement réalisable sans l'introduction de normalisations. En effet, il est inconcevable d'interconnecter des réseaux logistiques sans que les unités de chargement ne puissent être transférer efficacement entre les différents acteurs. Ce n'est pas le cas, par exemple, des caisses mobiles dont le transport maritime est impossible, des palettes européennes incompatibles avec les dimensions des conteneurs maritimes, etc. D'autre part, la faisabilité d'une telle interconnexion repose non seulement sur les caractéristiques physiques communes à l'ensemble des réseaux logistiques, mais aussi sur d'autres aspects.

3.1.2 Un socle en commun nécessaire pour interconnecter les réseaux logistiques terrestres

Nous avons vu dans le chapitre 2 que les réseaux logistiques de la grande distribution étaient composés de plusieurs sites s'échangeant des flux. Ces sites logistiques sont des usines, des entrepôts, des plateformes de distribution, et des points de ventes (supermarchés, hypermarchés, superette).

Considérons donc, à titre d'exemple, le schéma logistique (Figure 22) représentant les flux de marchandises depuis les usines aux points de vente. On considère ici un distributeur ayant 2 plateformes de distribution, et 6 points de ventes. On suppose, à des fins de simplification, que les produits de ce distributeur sont fabriqués uniquement par 2 usines. Bien évidemment cet exemple ne représente qu'une partie du réseau actuel vu la multiplicité réelle des acteurs.

Parmi les sites logistiques, on distingue ici les entrepôts où l'on stocke de la marchandise, des plateformes de distribution dont la fonction principale est le regroupement des achats et qui cherchent à avoir un faible niveau de stock. Cependant, si l'on se positionne en termes de flux, la notion de stockage est délicate à définir car il est possible que de la marchandise ait un séjour de seulement quelques heures dans des entrepôts dédiés à leurs stockage et notamment dans le cadre du jute à temps, et que de l'autre côté, le séjour soit de quelque jours de consommation au niveau des plateformes de distributions. On peut donc se représenter un entrepôt ou une plateforme, comme étant un nœud avec un stock, qui peut être réel dans le cas d'un entrepôt ou virtuel dans le cas d'une plateforme (Pimor et al. 2008). On peut aussi faire de même pour les usines et les points de ventes. Ainsi, la représentation en termes de flux du

réseau logistique donné par la Figure 22, serait sous forme d'un graphe avec des nœuds et des arcs indiquant les flux, comme le montre la Figure 27.

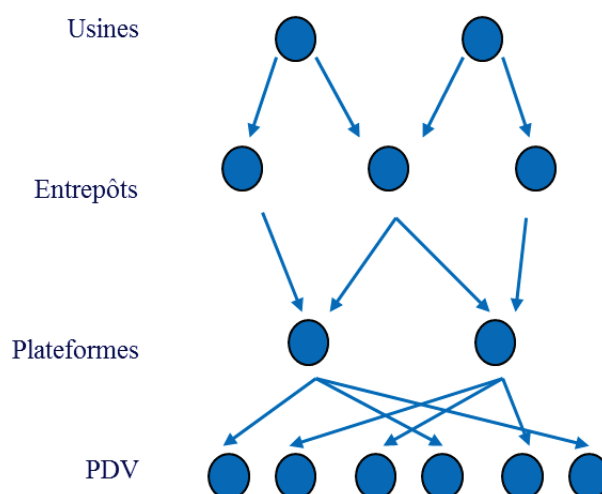


Figure 27: Flux de marchandises du réseau logistique présenté dans la Figure 22

Cette schématisation d'un réseau logistique montre bien le socle commun que partagent les sites logistiques, les usines et les points de ventes. Un réseau logistique quel qu'il soit est toujours composé de sites logistiques échangeant des flux de marchandises, gérant les stocks, les commandes et les transports. C'est ainsi qu'un réseau logistique peut être représenté par un graphe liant des nœuds entre eux, dans lequel chaque arc représente un flux et donc un schéma logistique. Cependant, ce socle en commun n'empêche pas l'hétérogénéité complexe entre les différents éléments qui composent les réseaux logistiques d'aujourd'hui.

Nous garderons pour la suite cette schématisation en graphe avec des nœuds représentant les sites logistiques, les usines et les points de ventes, et des arcs représentant les schémas logistiques. Essayons maintenant de visualiser l'intérêt d'une interconnexion des réseaux logistiques. Partons donc d'un exemple réel de deux réseaux logistiques, représentant chacun les flux entre un entrepôt industriel et des centres de distributions de leurs clients (Figure 28). On remarque que ces deux entrepôts industriels ont des clients en commun, notamment dans le sud-est, mais qu'ils seront livrés individuellement. En effet, même si les prestations logistiques tel que le transport sont généralement externalisées à des prestataires (3PL), ces opérations sont généralement réalisées indépendamment les unes des autres. On remarque donc qu'une possibilité de regroupement de flux et donc de massification qui est perdue. Cette opportunité de regrouper des flux diminuerait très certainement les tonnes-km. On pourrait

avoir le même raisonnement avec les flux en amont depuis les usines ou en aval vers les magasins.

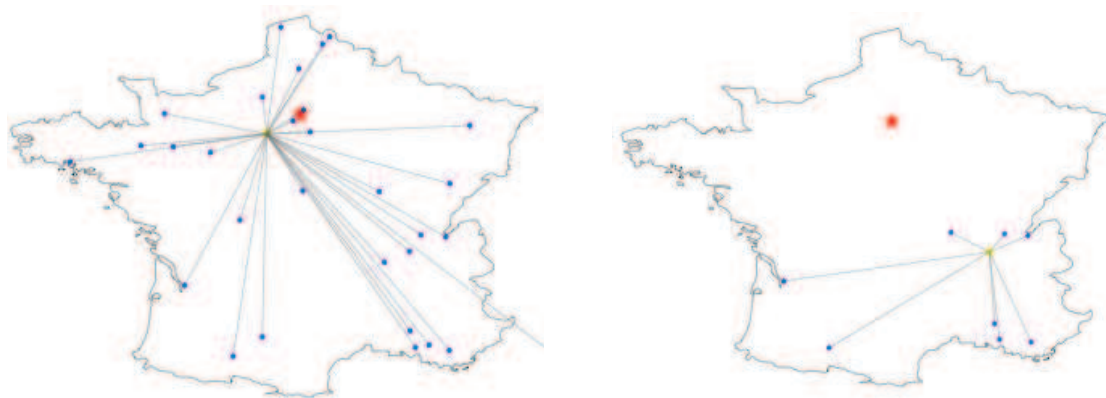


Figure 28: Exemple de deux prestations de produits d'épicerie pour la grande distribution exécutées indépendamment bien que touchant des clients communs - 1^{er} réseau à gauche et 2nd à droite (Ballot et al. 2010)

Ce chevauchement entre des prestations de transport est d'autant plus visible si l'on considère plus de flux et/ou plus de fournisseurs et de centres de distribution. En considérant les prestations de quelques fournisseurs importants, on remarque que de nombreux flux suivent des voies extrêmement proches mais qu'elles appartiennent à des prestations indépendantes (Figure 29). Ce qui représente une opportunité de regroupement considérable. Ce gain potentiel en transport serait encore plus conséquent si l'on considérait l'ensemble des parcours des moyens de transport, réduisant ainsi les trajets à vide. En effet, une analyse sur les transports à vide, menée par (Dejax et al. 1987) ,a mis l'accent sur l'importance de ce segment dans une perspective d'amélioration du transport de marchandises.

Grâce à cette visualisation, on comprend l'intérêt d'interconnecter des réseaux de prestations logistiques actuellement dédiés et indépendants. Cependant, l'hétérogénéité de ces différents réseaux pose un certain nombre de problèmes pour leurs interconnexions. Il en a été de même lors de la création de l'Internet car il a fallu inventer des concepts permettant de palier l'hétérogénéité des réseaux informatiques initialement dédiés.

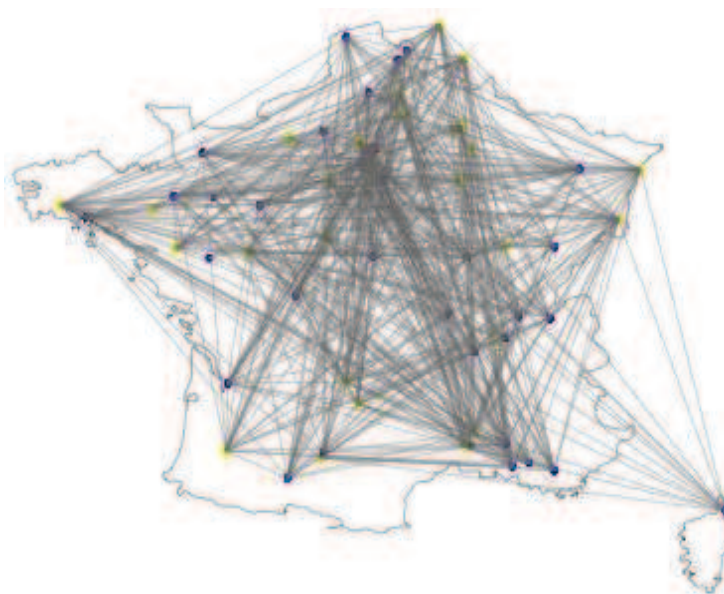


Figure 29: Superposition d'un ensemble de prestations (non exhaustif) de produits d'épicerie pour la grande distribution (Ballot et al. 2010)

Ainsi, nous devons analyser les principales difficultés à résoudre pour construire une interconnexion de réseaux logistiques et définir les éléments clefs, ce qui fera l'objet du prochain paragraphe. Ensuite, pour chacun de ces éléments clefs identifiés, nous proposerons des solutions en se basant sur les avancées de l'interconnexion des réseaux informatiques.

3.2 Concepts et problématiques physiques et organisationnelles associées à l'interconnexion des réseaux logistiques

Le dictionnaire LAROUSSE définit l'interconnexion comme étant le fait d'associer, par connexion (action de lier), des réseaux distincts. L'Internet Physique veut à ce titre lier des réseaux logistiques distincts car actuellement dédiés. Pour ceci, nous avons choisi de prendre exemple sur ce qu'a réalisé Internet pour interconnecter des réseaux informatiques hétérogènes. Nous allons, dans un premier temps, justifier le choix d'opérer ce parallèle. Puis, nous passerons en revue les principaux défis qu'ont dû résoudre les concepteurs de l'Internet, pour ensuite définir des éléments clefs nécessaires à la réussite de l'interconnexion des réseaux logistiques.

3.2.1 Le parallèle entre l'informatique et la logistique

La terminologie Internet vient de « Inter-Network » qui, comme son nom l'indique, est une interconnexion de réseaux informatiques. En effet, avant la création de l'Internet, se trouvait

des réseaux informatiques locaux et dédiés comme des réseaux universitaires ou les réseaux militaires, avec des ordinateurs différents, des supports physiques de transmission de la donnée hétérogènes entre réseaux et des langages de communications (dits protocoles) spécifiques à chacun (Hardy et al. 2002). A l'image de cette réussite qu'est Internet, l'Internet Physique se veut un nouveau concept permettant d'interconnecter des réseaux logistiques dédiés et hétérogènes.

Nous allons maintenant démontrer que dans les hétérogénéités relevées au niveau des réseaux logistiques, il y a des analogies avec celles que les réseaux informatiques ont rencontrées au moment où s'est posée la question de leur interconnexion. Considérons un hôte (ordinateur) qui envoie des informations via un réseau informatique, en créant une requête ou simplement en expédiant un e-mail. Cet envoi se fait suivant des protocoles (règles) que l'on peut résumer en trois étapes (Pujolle et al. 2008):

- Les données (qui sont sous formes de binaires) sont découpées en des tailles standards formant ainsi des paquets de données. Suivant la technologie employée (Ethernet, TCP/IP, etc.) et donc du réseau informatique en question, ces paquets de données ont des tailles différentes.
- Puis vient l'étape du transport, avec des trames (sorte de moyen de transport) qui viendront « encapsuler » les paquets de données déjà découpés. Il est à noter, que selon les technologies employées, ces trames ont des « capacités de chargement différentes ». On reviendra par la suite sur ces notions de trames et de paquets de données.
- Ensuite, la trame qui contient des paquets de données, les « transportera » à destination via des réseaux intermédiaires interconnectés par des routeurs. Ces réseaux peuvent avoir des topologies différentes : en anneaux, maillé, en arbre, en ligne, etc. et sont généralement un mix de ces topologies.

Cette façon d'expédier des paquets de données ressemble fortement à l'expédition de la marchandise via les multiples réseaux logistiques. En effet, les produits sont conditionnés dans des modes différents (palettes, conteneurs, caisses mobiles, etc.), puis chargés dans des modes de transports (camion, train, porte conteneur, etc.) qui transiteront sur des réseaux de transport dont les topologies sont aussi variées.

Cette analogie se confirme avec les mêmes niveaux d'hétérogénéité que l'on a notés dans les réseaux logistiques, à savoir : les typologies des réseaux, les modes de transport, les unités de chargement et leurs contenus (Tableau 5).

Tableau 5: Parallèles entre réseaux informatiques et logistiques

Réseaux Informatiques		Réseaux Logistiques	
Données	<i>Mails, Requêtes, etc.</i>	Contenu	<i>Produit, marchandise</i>
Paquet de données	<i>Ex. Datagramme</i>	Unité de chargement	<i>Palettes, conteneurs</i>
Transport	<i>Trames</i>	Modes de transport	<i>Routier, ferroviaire</i>
Réseaux	<i>Maillé, en étoile</i>	Réseaux	<i>Maillé, en étoile</i>

Ce parallèle entre les réseaux informatiques et logistiques suggère que l'étude des fondements de l'Internet Digital peut offrir un cadre de référence pour définir les modalités de construction d'un Internet Physique. Il est à noter que dans Internet le protocole le plus utilisé est TCP/IP qui a réussi à standardiser les paquets de données créant la notion de datagramme. Cette standardisation « des unités de chargement » de l'Internet et leur adaptation aux « modes de transports » (les trames) ont été des facteurs essentiels de sa réussite.

Afin d'établir les éléments clefs de l'interconnexion des réseaux logistiques, nous analysons tout d'abord ceux de l'interconnexion des réseaux informatiques dans le cadre de l'Internet.

3.2.2 Problématiques associées à l'interconnexion des réseaux informatiques

Afin d'assurer une interconnexion fiable entre les réseaux informatiques, les concepteurs de l'Internet ont proposé des solutions répondant à leurs caractères initialement hétérogènes. Parmi les principales problématiques qui ont été posées lors de l'interconnexion des réseaux informatiques, nous citons celles qui ont un intérêt pour notre recherche dans le cadre des réseaux de prestations logistiques:

- **Création d'un système d'adressage pour l'identification des émetteurs et des récepteurs de l'information** : Les échanges d'informations entre hôtes nécessitent un système d'identification des différents hôtes et routeurs qui interviendraient dans

l'acheminement de ces informations. Les réseaux informatiques initialement locaux et dédiés, avaient des systèmes d'identification différents, c'est pourquoi il est apparu nécessaire de les remplacer par un unique système d'identification (système d'adressage) valable dans l'ensemble du réseau Internet. Actuellement, la version la plus utilisée est la IPV6 (*Internet Protocol version 6*) (Cizault 2002).

- **Standardisation des échanges de flux d'informations** : De même que pour les systèmes d'adressage dédiés à chaque réseau informatique local, les données étaient découpées de façons différentes selon les réseaux pour ensuite être transportées. Les concepteurs de l'Internet ont donc standardisé ce découpage en créant une taille standard (dans le cas des TCP/IP par exemple) de paquets de données qui transiteront ensuite dans les différents réseaux. Il s'agit donc d'un niveau d'encapsulation (emballage) supplémentaire.
- **Standardisation du transport de l'information** : Dans un même souci de standardisation, des « moyens de transport » standards ont été créés, à savoir les trames (on reviendra plus en détail sur ces notions). La création des trames et des « paquets de données », entrent dans le cadre de la création de protocoles standards pour tous les utilisateurs de l'Internet, dont les plus connus sont les protocoles TCP/IP.
- **Sélection des itinéraires des données** : Une fois les réseaux interconnectés, et devant la multiplicité des hôtes et des routeurs, la question qui s'impose est la définition des chemins (routes) qu'emprunteront les paquets de données jusqu'à une destination. La question n'est pas simple car pour définir une route il faut trouver un système permettant de connaître instantanément et en permanence les états des connexions des différents réseaux afin de déterminer le ou les meilleurs chemins. Des algorithmes ont été créés à cet égard, et les plus connus sont ceux dits à « états de liens » ou à « vecteurs distances ».
- **L'identification d'une topologie du réseau Internet interconnectant l'ensemble des réseaux informatiques dédiés** : L'interconnexion des réseaux nécessite en pratique de relier certains nœuds (hôtes ou routeurs) via des supports physiques (câbles), et aussi s'il le faut en créer de nouveaux. Mais il y a des choix à faire quant à la topologie du réseau résultant qui peut être un réseau en anneau, hiérarchique, en bus,

en étoile, linéaire, maillé, etc. Le réseau Internet est en réalité un mix de plusieurs topologies, qui seront détaillées ultérieurement.

- **L'établissement de modèles d'affaires garantissant les échanges de flux entre acteurs et par suite la pérennité de l'Internet** : Les réseaux dédiés que les concepteurs d'Internet voulaient interconnecter, avaient leurs propres administrateurs et les FAI (Fournisseurs d'Accès à Internet) qui permettaient la mise en œuvre de l'interconnexion, étaient aussi gérés par des organisations indépendantes. Il a donc fallu prévoir des modèles d'affaires garantissant la viabilité de l'interconnexion et des échanges d'informations entre ces réseaux.

A l'image des concepts développés pour Internet, l'Internet Physique devra répondre aux problématiques de l'interconnexion.

3.2.3 L'interconnexion des réseaux logistiques : Eléments clefs

De même que dans Internet, l'interconnexion des réseaux logistiques et donc l'Internet Physique, nécessite de répondre à des interrogations résultant de la création même de ce nouveau réseau d'une part, et de l'hétérogénéité des éléments qui le constitueraient, d'autre part.

Les principales problématiques qui s'imposent donc pour l'interconnexion des réseaux logistiques, sont :

- **Création d'un système d'adressage pour l'identification des nœuds des réseaux logistiques** : Les nœuds de l'Internet Physique ont la spécificité d'avoir des positions géographiques liées à leurs adresses postales. Cependant, si nous poussons ce concept plus loin, on peut ajouter un niveau supérieur de précision pour la destination des expéditions. En effet, on peut concevoir pour un produit destiné à ligne de production particulière (dans une usine) une adresse spécifique facilitant son acheminement à destination. De même pour un conteneur à destination d'un rayon spécifique dans une grande surface, etc. A l'image de l'Internet, ceci pourrait se faire via un système de localisation spécifique, avec un système d'adressage que l'on pourrait appeler adresse PI (en référence aux adresses IP dans le protocole de communication TCP/IP dans Internet), couplé à l'adressage postal et aux coordonnées géographiques. Cette question, certes importante, ne sera pas traitée dans cette thèse.

- **Standardisation physique pour l'échange des flux :** Nous avons vu que les échanges de flux entre différents prestataires nécessitent une standardisation dans les formes, dimensions et interfaces de ce qui est transporté permettant aux différents acteurs d'optimiser leurs manipulations, stockages, tris, entreposages, décompositions, etc. On abordera plus en détail cette problématique lors du paragraphe 3.3.
- **Standardisation du transport de marchandises conteneurisées :** Cette question est très liée à la standardisation des modes de conditionnement des marchandises, car les moyens de transport, quels qu'ils soient, devront être adaptés pour transporter efficacement et sans gaspillage d'espace ces marchandises conteneurisées. On abordera cette problématique en même temps que celle de la conteneurisation dans le paragraphe 3.3.
- **Sélection des itinéraires des marchandises :** Une fois le réseau des réseaux obtenu, il faudra, comme dans le cas de l'Internet, trouver un moyen pour collecter les informations nécessaires au routage des marchandises. A ce niveau il faut faire attention car plusieurs différences s'imposent entre les flux de données et ceux des marchandises. On reviendra plus en détail sur cette notion de routage dans le cadre des réseaux informatiques et dans le cadre des réseaux logistiques, lors du paragraphe 3.6.
- **Topologie du réseau PI interconnectant l'ensemble des réseaux logistiques dédiés :** Interconnecter des réseaux logistiques revient à créer de nouvelles prestations de transports (et qui s'accompagneraient donc d'autres prestations logistiques tels que l'entreposage, le stockage, etc.) entre des sites logistiques déjà existants ou même en en créant de nouveaux, si besoin. Comme dans le cas d'Internet, la topologie du réseau peut avoir plusieurs formes (en étoiles, hiérarchiques, etc.). Ce sujet sera l'objet du paragraphe 3.4 qui proposera des solutions en partant du cas de l'Internet.
- **L'établissement de modèles d'affaires garantissant les échanges de flux entre acteurs:** Les réseaux de prestations logistiques sont actuellement dédiés et gérés par des organisations commerciales indépendantes. Leurs interconnexions serviront à s'échanger des flux, ce qui revient à créer et à échanger des prestations logistiques. Il est donc nécessaire de définir un cadre juridique pour ces échanges et aussi un modèle

d'affaires garantissant la pérennité d'un tel système de partage de ressources. Ceci sera l'objet du paragraphe 3.5.

Ainsi à partir des difficultés liées à l'interconnexion des réseaux informatiques, nous avons établi une liste d'éléments clefs pour la réussite de l'Internet Physique. Cette liste n'est pas exhaustive, mais représente une première étape dans la définition des concepts clefs nécessaires à l'interconnexion des réseaux logistiques. A fur et à mesure de notre avancement dans ces concepts, nous aborderons d'autres éléments comme celui de l'adaptation nécessaire entre les conteneurs transportés et les infrastructures de manutention et de stockage ou encore le besoin de la traçabilité, etc.

Le prochain paragraphe vient donc répondre à la nécessité de la standardisation des unités de chargement. Nous en viendrons ensuite à la question de la topologie du réseau résultant, puis à celle de l'établissement d'un modèle d'affaires garantissant les échanges de flux entre acteurs. Finalement on développera des algorithmes pour la détermination du chemin des expéditions.

3.3 La conteneurisation

A l'image du découpage des informations, que font les protocoles de l'Internet, en des paquets de données standardisées, (Montreuil 2010) propose que les marchandises soient conteneurisées pour ensuite être transportées. Par conteneurisation, on signifie la création de conteneurs dans lesquels seront chargés les produits. Ensuite ce sont les conteneurs qui seront manipulés notamment lors du transport.

Nous allons, dans une première étape, justifier l'intérêt de la conteneurisation vis-à-vis des besoins de l'interconnexion. Puis nous aborderons l'exemple des réseaux logistiques maritimes qui ont justement conteneurisé les marchandises, une source de gain en productivité considérable. Enfin, nous procéderons à l'analyse des attentes des conteneurs de l'Internet Physique.

3.3.1 L'intérêt de la conteneurisation

Le conteneur est une sorte de « boîte » rigide qui contient de la marchandise et dont le but principal est de faciliter les activités de manutention et de transbordement, et donc de réduire les coûts logistiques. Cette réduction des coûts est due à la standardisation des formes et dimensions, qui permet une automatisation des opérations de manutention via des équipements spécialement conçus à cet effet, ainsi qu'une meilleure utilisation des volumes

de chargement des moyens de transport (Frémont 2005). La conteneurisation a aussi d'autres avantages tels que l'anonymisation, la sécurisation des marchandises contre le vol, les chocs, l'environnement, et la diminution de la rupture de charge de la marchandise.

(Chevalier et al. 2004) définissent le conteneur comme étant « *le vecteur par excellence de l'inter-modalité : son caractère standard et interchangeable et sa robustesse qui en permet un usage répété font du conteneur le commun dénominateur des transports de surface : il passe du train au navire, du navire à la remorque routière en un minimum de temps grâce aux portiques et engins normalisés spécialement conçus pour sa manutention...* »

La conteneurisation apparaît donc comme fondamentale dans le cadre de l'interconnexion des réseaux de prestations logistiques. En effet, nous avons vu l'hétérogénéité des unités de chargement et les problématiques associées à l'absence d'une unification unique à ce sens. Nous rappelons qu'un parc hétérogène de palettes et de conteneurs existent même si les normalisations ISO ont œuvré vers plus de standardisation. Nous avons cependant noté, que les conteneurs normalisés ne permettaient pas un chargement optimal des palettes européennes, justifiant ainsi l'importance d'une harmonisation de ces unités de chargement. Ceci est d'autant plus vrai dans le cadre d'une interconnexion des réseaux logistiques.

Une conteneurisation standardisée nécessite de prévoir que les moyens de transport soient adaptés, en termes d'espace de chargement, aux tailles et aux dimensions des conteneurs, évitant le gaspillage de l'espace et que les conteneurs puissent être transportés par l'ensemble des modes de transport. A cet effet, on peut citer l'exemple de la conteneurisation maritime, qui a provoqué une « *standardisation complète des techniques de transport tant sur mer que sur terre* » avec des navires et des semi-remorques adaptés (Frémont 2005). D'autre part, le caractère modulaire est important à prévoir pour les conteneurs de l'Internet Physiques. Cette modularité est nécessaire pour une optimalité des chargements.

En n'utilisant que des conteneurs standards, qui peuvent eux-mêmes contenir des palettes ou d'autres conteneurs, les acteurs logistiques pourront offrir de meilleurs services car cette standardisation leur permettra une meilleure adaptation en termes de manutention, de stockage mais aussi d'échange d'informations (Figure 30).

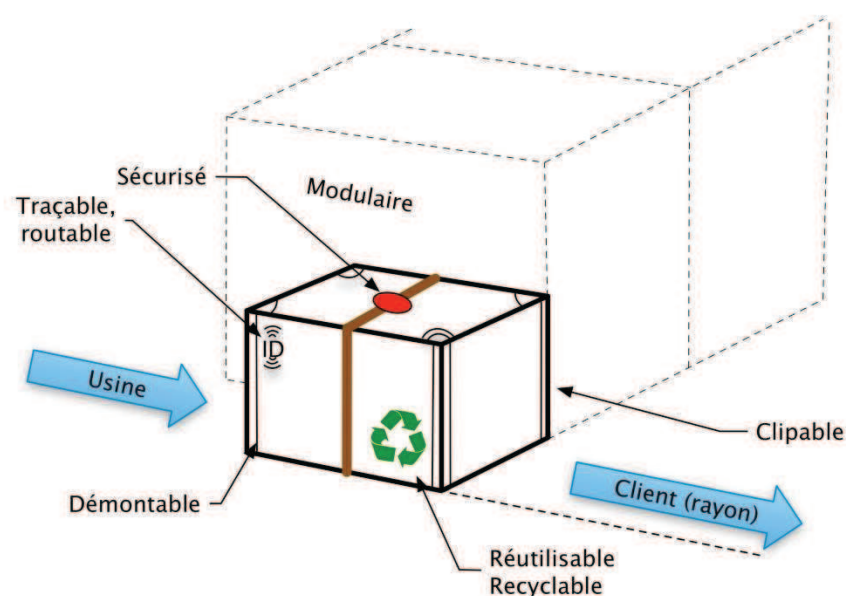


Figure 30: Conteneurs modulaires pour l'Internet Physique (Ballot et al. 2012b)

On voit bien ici, l'intérêt de la conteneurisation standardisée dans une optique d'interconnexion de réseaux de prestations logistiques, qui reconstitue un espace privé dans un ensemble de réseaux ouverts.

3.3.2 La conteneurisation : Un concept déjà développé dans le transport maritime

La conteneurisation est considérée comme une innovation de rupture dans le transport maritime (Frémont 2005), et un bouleversement sans lequel il n'y aurait pas eu un tel essor de la mondialisation des échanges commerciaux (Levinson 2008). Dans un article du Figaro paru le 13/11/11 et intitulé « *Le conteneur a révolutionné l'économie mondiale* », la conteneurisation est qualifiée comme étant « *le Véritable soutien des échanges internationaux... Sans lui, la mondialisation n'existerait pas* ».

En effet, le conteneur maritime standardisé a permis une réduction considérable des coûts et des temps de transport, grâce à des opérations de manutention beaucoup plus rapides et moins coûteuses, ce qui implique aussi un gain, dû aux économies d'échelle, pour l'ensemble des infrastructures portuaires et de transports comme les porte-conteneurs.

Aujourd'hui, grâce à la conteneurisation, on considère que le transport maritime « *n'a plus d'incidence sur les décisions économiques* » (Levinson 2008). En effet, les économistes Edward L. Glaseser et Janet E. Kohlhase, cités par (Levinson 2008), déclarent qu'il « *vaut mieux considérer que le transport de marchandises est essentiellement gratuit, plutôt que de*

l'envisager comme composant fondamentale de production ». Cette déclaration était totalement inenvisageable avant l'apparition du conteneur maritime, car il revenait très cher avec un fret qui « *pouvait égaler 25% du coût du produit* ». Ceci n'est pas une surprise quand 60 à 75% du coût de transport d'une cargaison était consommé à quai et non pas lors du voyage en mer (Levinson 2008), car charger et décharger des caisses, des cartons et parfois même des produits manuellement nécessitaient beaucoup de temps.

La conteneurisation a donc permis de créer une unité de charge, et par la suite d'automatiser les opérations de manutention, de stockage et de transfert multimodal (trains ou camions), grâce aux portiques à conteneurs que l'on retrouve aujourd'hui dans les grands ports maritimes. Les performances de ces « hubs » ont contribué au recours massif à ce type d'unité de charge. La conteneurisation a aussi entraîné une adaptation des moyens de transport avec des navires porte-conteneurs, des remorques et des wagons conçus pour transporter à bien ces conteneurs maritimes. On voit donc un sous-ensemble de réseaux logistiques adapté au conteneur qui s'est mis en place (Frémont 2005).

3.3.3 Les conteneurs de l'Internet Physique

En partant d'une analyse théorique, et de l'étude d'un cas réel, à savoir le transport maritime, on peut imaginer que ce concept transposé à l'Internet Physique soit un moteur essentiel quant à la réussite de l'interconnexion des réseaux logistiques.

Plus particulièrement, l'encapsulation définie pour Internet fonctionne essentiellement comme une interface standard permettant à tout routeur Internet de manipuler le paquet. L'information n'est pas manipulée en tant que telle mais n'est pas protégée non plus. En revanche dans le domaine de la logistique les conteneurs, qui forment l'encapsulation, n'ont pas uniquement comme fonction de permettre une interface standard entre la marchandise et les moyens de transport. En effet, ils sont aussi chargés de protéger la marchandise et de la rendre anonyme. Ainsi et à la différence des palettes, les marchandises conteneurisées et appartenant à des concurrents peuvent être transportées et stockées cote à cote sans difficultés. Dans le cas des marchandises palettisées la confidentialité des opérations est assurée par les murs des bâtiments ou des camions et l'interfaçage des systèmes d'information des partenaires. Il apparaît donc que le but de la conteneurisation dans l'Internet Physique n'est pas seulement de permettre la manutention et la protection mais également de créer un espace privé dans une infrastructure ouverte et partagée.

On appelle les conteneurs de l'Internet Physique des PI-conteneurs⁸ pour les différencier des conteneurs maritimes actuels. La conception de ces PI-conteneurs ne fait pas partie des objectifs de ce mémoire de thèse, mais des travaux sont en cours dans ce sens.

Quelques éléments concernant les attentes de tels conteneurs sont tout de même à préciser (Ballot et al. 2010):

- Ils devront être standardisés, comme dans le transport maritime, avec des normes internationales.
- Ils doivent être de tailles modulaires afin de les assembler facilement et permettant une meilleure utilisation de l'espace de chargement. Il serait aussi intéressant que les PI-conteneurs soient emboîtables dans les conteneurs maritimes évitant des pertes d'espace.
- Ils doivent être emboîtables pour que d'autres PI-conteneurs plus petits puissent y être chargés.
- Les infrastructures des différents sites logistiques (que l'on appelle les hubs de l'Internet Physique) devront être adaptées pour manipuler et stocker les différents PI-conteneurs, comme c'est le cas dans les ports pour les conteneurs maritimes.
- Les PI-conteneurs doivent être munis d'un système d'identification nécessaire pour un suivi et une traçabilité. De telles technologies d'information et de communication (TIC) facilitent aussi l'automatisation des opérations de tri, de stockage, la détermination du chemin restant, etc.

L'intérêt des PI-conteneurs doit donc résider dans la facilité des différentes opérations de manutention, de stockage et de transport, ce qui a fait le succès du transport maritime. Il faut cependant prévoir que de tels standards auront un impact sur l'ensemble des chaînes logistiques, jusqu'à la conception des produits à acheminer et des moyens de transport qui pourront adapter leurs formes et leurs dimensions à ceux des conteneurs qui les transporteront.

Ayant analysé le besoin d'une conteneurisation standardisées dans un Internet Physique, nous aborderons, dans le prochain paragraphe, la notion de la topologie du réseau interconnectant l'ensemble des réseaux de prestations logistiques.

⁸ PI est ici utilisé comme sigle pour Physical Internet.

3.4 Topologie du réseau formé par les réseaux interconnectés

Le but de ce paragraphe est d'analyser la manière avec laquelle le réseau Internet interconnecte les différents réseaux informatiques et de s'en inspirer pour proposer des méthodologies d'interconnexion des prestations logistiques dans le cadre de l'Internet Physique. De même, on étudiera le transit des flux d'informations dans Internet et celui des conteneurs dans PI.

Il est à noter que l'interconnexion des réseaux signifie non seulement la manière avec laquelle se fait une connexion directe entre deux réseaux, mais aussi la topologie du réseau global qui en résulte.

Ainsi, la première sous-partie sera consacrée à l'étude de l'interconnexion en tant que connexion simple et directe entre deux ou plusieurs réseaux, ainsi qu'au transit des flux.

Nous en viendrons ensuite à la question de la topologie du réseau global.

3.4.1 Connexion entre réseaux et transit des flux

Notre méthodologie de recherche a été de prolonger le parallèle avec l'Internet. Ainsi, la première partie du paragraphe est consacrée à l'étude de la connexion entre les réseaux informatiques dans Internet, ainsi qu'au transit des paquets de données. Nos propositions pour l'Internet Physique feront l'objet de la seconde sous-partie.

3.4.1.1 Le cas de l'Internet Digital

Internet est par définition le réseau des réseaux car il permet la connexion des différents réseaux informatiques et ainsi un transit universel des données.

3.4.1.1.1 La connexion des réseaux informatiques

Dans Internet, la connexion de deux réseaux informatiques se fait via des « *ordinateurs spécifiques qui transfèrent des paquets de données d'un réseau à un autre* » (Comer 2006) (Figure 31). Ces ordinateurs spécifiques sont appelés des « routeurs ». Ainsi, entre deux réseaux voisins, ce sont les routeurs qui les lient qui permettent le transit des données. On rappelle que les données informatiques seront découpées en plusieurs paquets de données. Pour transiter entre deux ordinateurs distants de plusieurs réseaux, les paquets de données

seront acheminés via les routeurs interconnectant les différents réseaux intermédiaires par lesquels ils transiteront, pour atteindre le réseau de destination, puis l'ordinateur destinataire, appelé hôte.

La même logique de fonctionnement se retrouve au sein de chacun de ces réseaux qui comportent au moins un routeur permettant aux hôtes du réseau de communiquer entre eux et avec les réseaux extérieurs. Le rôle du routeur est finalement d'assurer l'acheminement des paquets leur indiquant, lors de leurs arrivées, et suivant leurs destinations, le prochain routeur vers lequel ils doivent s'orienter. Ainsi, ils arriveront jusqu'à destination de proche en proche.

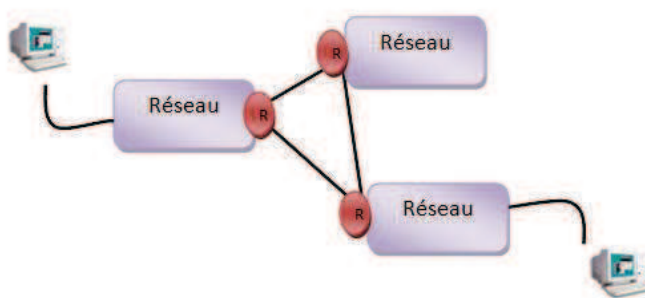


Figure 31: Connexions de réseaux via des routeurs

Nous verrons par la suite que si on pouvait transposer cette façon de connecter les réseaux informatiques pour connecter un ensemble de réseaux de prestations logistiques, on créerait le réseau Internet Physique.

3.4.1.1.2 Le transit des flux d'informations entre les réseaux de l'Internet

Le transit des flux d'informations entre deux réseaux dans Internet se fait via les routeurs dont la fonction principale est de déterminer la direction que doit prendre chaque paquet de données. Un paquet de données contient non seulement les données à transférer mais aussi l'adresse de source et de destination. En effet, si nous considérons le protocole le plus utilisé dans Internet, le protocole TCP/IP, les paquets de données provenant du découpage des données à expédier, appelé « datagrammes », sont composés d'un en-tête relatif aux adresses IP des hôtes source et destination (Figure 32).



Figure 32: Datagramme IP

Chaque routeur dispose d'une table de routage qui fait correspondre pour chaque adresse de destination la direction que doit emprunter le datagramme afin d'arriver à sa destination de la meilleure des façons (meilleure selon un ou plusieurs critères prédétablis). Une table de routage donne uniquement le prochain routeur que doit emprunter le datagramme, et on appelle cette opération le routage (Huitema 1999, Servin 2003, Pujolle et al. 2008).

Par analogie, c'est comme s'il s'agissait d'un rond-point avec des panneaux de direction pour chaque destination, une route entre deux ronds-points représentant une connexion entre deux routeurs. La construction de la table de routage est assez compliquée, et sa taille dépend de celles des réseaux que le routeur correspondant interconnecte (Comer 2006).

Cette table de routage représente le cœur du fonctionnement de chaque routeur. Prenons un exemple : considérons un morceau de réseau dont l'architecture est représentée par la Figure 33:

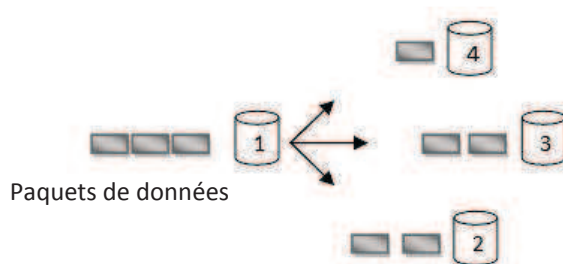


Figure 33: Fonctionnement du routage; 1,2,3 et 4 sont des routeurs

Destination Address	Output Link
127.23.34.188	2
123.45.12.45	2
152.45.34.22	3
129.23.x.x	4

Figure 34: Table de routage

Nous avons ici 4 routeurs (numérotés de 1 à 4) et des datagrammes (les rectangles gris). Nous avons les connexions suivantes entre les routeurs ; Connexion Routeurs 1-2, Connexion Routeurs 1-3 et Connexion Routeurs 1-4.

Considérons un émetteur qui envoie des datagrammes vers le routeur 1 avec lequel il est connecté. A la réception de chacun de ces datagrammes, le routeur 1 consulte sa table de routage qui lui indique, suivant l'adresse de destination du datagramme, la direction (prochain

routeur) que ce dernier doit emprunter. Un exemple d'aperçu de la table de routage du routeur 1 est donné dans la Figure 34 (le prochain routeur est indiqué dans la colonne « Ligne de sortie »).

Si l'adresse en question correspond à la destination finale, le datagramme est arrivé à destination. Si le routeur en question n'est pas la destination finale, ce dernier réitérera la procédure appliquée par le routeur précédent, et ainsi de suite jusqu'à arriver à la destination du datagramme.

Le transport des datagrammes se fait via leur incorporation dans des trames. Dans TCP/IP, chaque trame contient uniquement un datagramme (Figure 35). Cela n'a pas toujours été le cas dans les réseaux informatiques car les tailles de trames et des paquets de données dépendaient des technologies employées initialement (Comer 2006). Ainsi une trame pouvait contenir un ou plusieurs paquets de données (Figure 36). De plus, du fait de cette hétérogénéité des tailles, lors de l'interconnexion des réseaux informatiques les « chargements » des trames avec des paquets de données de technologies différentes n'étaient pas optimaux. C'est ainsi que le protocole TCP/IP a proposé des paquets de données (datagramme) et des trames standards adaptées.

Si nous considérons la trame comme un paquet de données, on peut parler de paquets de données qui « encapsulent » d'autres.

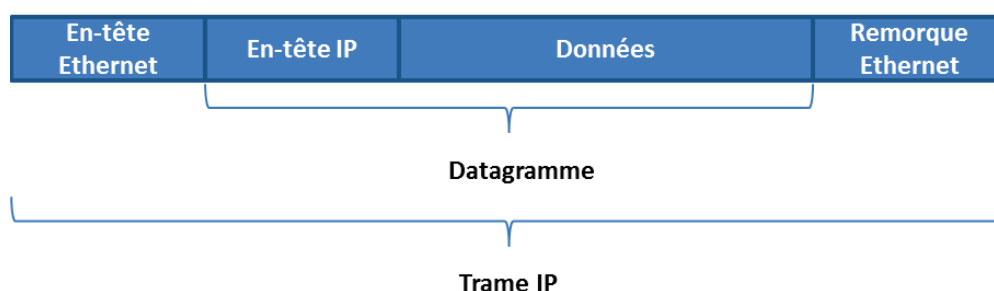


Figure 35: Exemple de trame dans TCP/IP

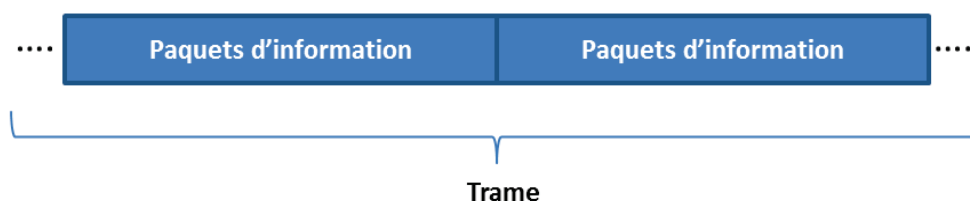


Figure 36: Trame encapsulant des paquets de données (cas général)

Lors de l'arrivée d'un datagramme à un routeur, il est extrait de la trame, puis se trouve dans une file d'attente avant d'être traité. Le routeur s'occupera, en effet, de lire l'entête des datagrammes et ensuite, pour chacun d'eux, d'accéder à la partie qui concerne l'adresse de destination. Puis, il placera le datagramme sur le port de sortie correspondant, et sera encapsulé dans une autre trame pour l'acheminer vers le routeur voisin... ainsi de suite jusqu'à arriver à destination finale.

Pourrions-nous transposer ces concepts d'encapsulation, de datagrammes, de trames, de files d'attente, et de tables de routage dans l'Internet physique ? C'est ce que nous nous efforcerons de démontrer par la suite.

3.4.1.2 Transposition à l'Internet Physique en tant qu'interconnexion de réseaux de prestations logistiques

De même, que dans Internet, l'Internet Physique doit permettre la connexion des différents réseaux de prestations logistiques et donc devrait assurer le transit universel de la marchandise.

3.4.1.2.1 La connexion des réseaux de prestations logistiques

Au niveau physique, une prestation logistique est réalisée dans un réseau constitué de nœuds (hubs, plateformes et les entrepôts, usines,...), de prestations logistiques (schémas de transport terrestres, stockage, groupage...) et des émetteurs/récepteurs finaux (entreprises ou particuliers). En appliquant l'analogie avec les réseaux informatiques, un émetteur transporte ou fait enlever sa marchandise par un nœud proche qui s'occupera de la stocker, la manutentionner et l'envoyer vers sa destination via un schéma logistique adapté et choisi. Pour circuler dans différents réseaux logistiques, la marchandise doit être manipulable, protégée et identifiée. Donc, comme dans le cas des données sur Internet, la marchandise doit être conditionnée sous une forme standard. On parlera ici de conteneurs au sens large, ce qui rejoint le concept de conteneurisation modulaire que nous avons présenté dans le paragraphe 3.3 (Montreuil 2009, Sarraj et al. 2013). Ce fonctionnement nous permet d'analyser l'analogie qu'il peut y avoir entre un réseau logistique et un réseau informatique (Cf. Tableau 6).

Tableau 6: Analogie entre réseau informatique et physique

Réseau	Internet	Internet Physique	Fonctions principales
Flux	Datagramme	Conteneur	Encapsulation, anonymisation des marchandises, identification,
Nœud	Routeurs	Hub	Lieu d'orientation (de tri), de changement de mode, de prestataire.
	Hôtes (adresse unique)	Fournisseur ou client ou consommateur	Lieu de conteneurisation et de dé-conteneurisation
Arc (connexion)	Liaison physique (filaire ou par onde)	Schéma logistique	Service régulier de transport entre deux nœuds.
	Trame	Prestation de transport	Service ponctuel de transport entre deux nœuds.

On note qu'un hôte est un lieu d'entrée ou de sortie de l'Internet Physique. Il s'agit donc de l'endroit où sont conteneurisés les biens. Il peut s'agir aussi bien d'un poste sur une ligne d'assemblage, qu'un emplacement dans un linéaire d'un point de vente, voire le domicile d'une personne.

Une connexion entre routeurs peut être vue comme une liaison physique (filaire ou par onde) ou comme un service de « transport », représentant ainsi les « voyages » des trames. De même, une connexion entre hubs peut être vue comme un schéma logistique ou une prestation de transport particulière.

La connexion entre deux réseaux logistiques peut se faire via la création de nouveaux schémas logistiques entre les nœuds des deux réseaux et l'adaptation du fonctionnement des plateformes logistiques à chaque extrémité du service pour être en mesure de traiter les flux provenant de l'autre. Cette façon logique et intuitive de connecter des réseaux existe d'ailleurs dans des solutions bilatérales d'accord de partage de trafic mais sans généralisation possible car sans normalisation globale des contenants, des données associées et des processus de prise en charge (ex. mutualisation). A l'exception notable mais malgré tout partielle des flux maritimes qui reposent sur des conteneurs standardisés, une identification universelle BIC et

des systèmes de partage des données. Ainsi dès que l'on touche terre, les conteneurs sont ouverts et l'interconnexion n'est pas assurée.

On constate ainsi en logistique des technologies différentes suivant les modes et la taille des flux. Un peu comme si les réseaux haut débit *backbone* (Tanenbaum 2003) n'étaient pas facilement connectés aux réseaux locaux. On perçoit ici l'enjeu de l'interconnexion des réseaux hétérogènes mais aussi les difficultés qu'il faut surmonter.

Analysons maintenant comment pourrait se faire le transit des marchandises entre les différents réseaux de prestations logistiques.

3.4.1.2.2 Le transit des flux de marchandise entre les réseaux logistiques

L'idée d'avoir des paquets de données encapsulés les uns dans les autres (données dans datagramme et datagramme dans trame), et que des décapsulations et encapsulations soient réalisées à chaque passage dans un routeur, est intéressante pour l'Internet Physique. Une transposition pourrait se faire en considérant que la marchandise sera encapsulée sous forme d'un ensemble de PI-conteneurs standardisés (datagrammes) interfacés sur chaque moyen de transport (trames), et que des déchargements et des chargements se feront à chaque passage par un hub. Ceci rejoint bien les attentes de l'Internet Physique en termes de conteneurisation modulaires (paragraphe 3.3) et son adaptation aux dimensions des moyens de transport. Il s'agit d'ailleurs de la même problématique qu'a eue l'Internet pour interconnecter des réseaux informatiques avec des technologies différentes et donc des tailles de trames et de paquets variées. Il a donc fallu adapter les trames aux paquets de données via un processus de standardisation.

La question de la détermination de la route pourrait aussi se faire via des tables de routage par transposition de ce concept dans Internet, nous reviendrons en détail sur cette question dans le paragraphe 3.6. L'analogie entre les rôles des différents composants physiques de l'Internet et de l'Internet Physique vient se renforcer notamment au niveau des liens entre les routeurs et les PI-Hub (Tableau 7).

Tableau 7: Analogie entre routeurs de l'Internet et PI-hub

Fonction	Routeurs dans Internet	PI-hub
Réception	Dé tramage et tramage suivant les protocoles réseaux utilisés	Déchargement et ou décomposition de PI- conteneurs en entrée
Routage	Acheminement suivant une table	Sélection de la prochaine destination
Expédition	Mises en trame suivant le réseau sélectionné	Composition de PI- conteneurs et chargement sur moyen de transport

3.4.2 Topologie du réseau des réseaux

Cette partie concerne l'étude de la topologie du réseau de l'Internet Physique.

3.4.2.1 Le cas de l'Internet Digital

L'interconnexion, si elle permet de relier tout nœud, ne signifie pas qu'il existe un arc entre chaque couple de nœud. Bien au contraire, devant le nombre élevé d'utilisateurs d'Internet, la conception de ce réseau a été faite de façon à limiter le nombre d'arcs pour des raisons d'investissement et de facilité de routage qui seront étudiées ci-après.

Internet présente en fait une structure de type fractale, dans le sens où la topologie des réseaux de chaque niveau de la hiérarchie peut se reproduire de manière plus ou moins similaire à d'autres niveaux. Il est composé, sur son niveau hiérarchique le plus haut, d'un ensemble de grands réseaux interconnectés, appelés des « Systèmes Autonomes » (Figure 37). En effet, Internet n'étant pas contrôlé par un unique administrateur, on introduit la notion de systèmes autonomes (SA) dont chacun est géré d'une manière indépendante par un seul opérateur mais dans le respect des standards et des principes (généralement un SA est un grand opérateur public ou privé). Les SA communiquent entre eux via des routeurs spécifiques dits « routeurs frontières » qui impliquent le passage de relai à un autre gestionnaire et donc via des accords de trafic. A contrario, le transfert des informations au niveau interne des SA se fait via des

routeurs dits « routeurs internes » et la communication interne est réalisée grâce à d'autres types de protocoles.

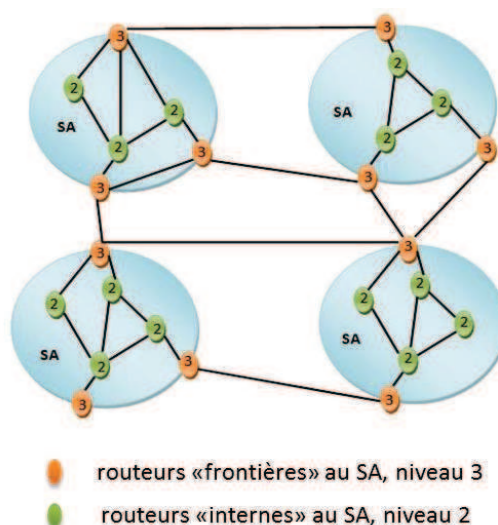


Figure 37: Schématisation conceptuelle de l'Internet, réseau d'interconnexion de SA

Ces différentes relations entre les SA sont fonctionnelles, ce qui signifie que les SA peuvent être géographiquement confondus. De plus, chaque système autonome est lui-même composé d'autres réseaux qui sont des « zones » (ou « aires »). Dans les deux cas on parle de sous-réseaux ayant ou non leur gestion propre. Cette décomposition peut continuer à un troisième niveau pour avoir des sous-réseaux de sous-réseaux et ainsi de suite jusqu'à arriver au réseau local ou à un hôte. Il n'y a pas de nombre de niveaux spécifiques dans le réseau Internet, mais la pratique indique que l'on peut y distinguer trois niveaux hiérarchiques dont le niveau le plus bas (niveau 1) correspond généralement à des fournisseurs d'accès Internet (FAI) ou des routeurs intra-universitaires dans Renater par exemple (Hardy et al. 2002, INRIA 2011).

On retrouve ainsi ces trois niveaux dans une schématisation conceptuelle de l'Internet (Figure 38), ainsi que dans une schématisation hiérarchique (Figure 39).

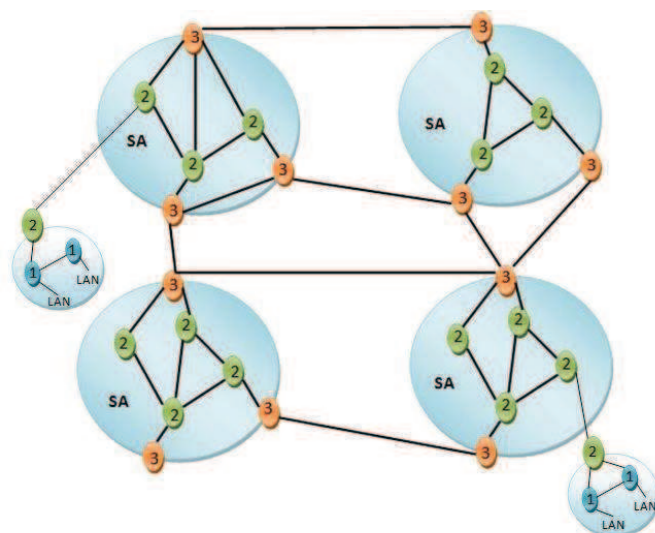


Figure 38 : Schématisation conceptuelle de l'Internet, réseau d'interconnexion de SA. Les chiffres correspondent à des niveaux de hiérarchie

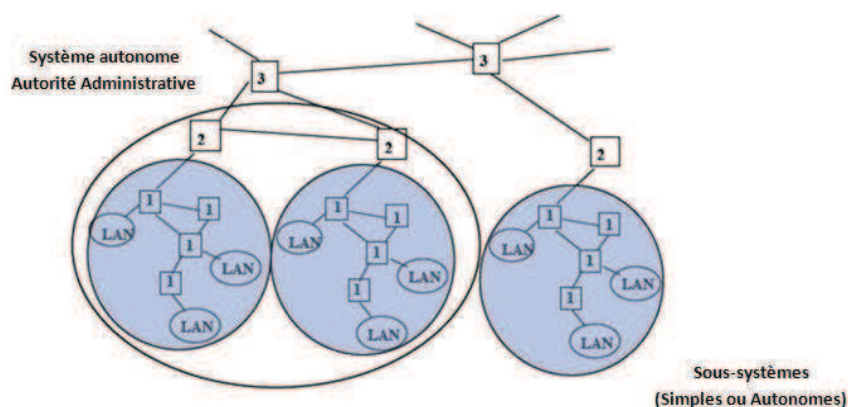


Figure 39: Schématisation hiérarchique du réseau Internet sous forme de 3 niveaux
(LAN = réseau local)⁹

Cette topologie à la fois maillée et fractale permet à la fois la résilience d'Internet, la limitation des infrastructures et la limitation de la taille des données nécessaires au sein des routeurs pour l'acheminement des datagrammes du fait de la limitation en nombre des interconnexions entre les réseaux. En effet, il est plus facile d'acheminer des datagrammes lorsqu'il y a des points de passages connus et en nombre limité que lorsqu'ils sont nombreux (Mathon 2003). Ces points de passage correspondent à quelques routeurs qui permettent

⁹ Cours Réseaux 3 – couche réseau de M. Sicard.

l'accès à l'extérieur des sous-réseaux, comme par exemple les routeurs 3 par rapport aux SA dans la Figure 38. Il y a donc à la fois des économies d'échelle et de la résilience dans ce système distribué.

La question qui se pose maintenant est de savoir comment pourraient être transposés ces principes de la topologie du réseau Internet pour définir celle de l'Internet Physique et les conséquences prévisibles d'un tel basculement de logique ?

3.4.2.2 Transposition à l'Internet Physique

Devant le nombre très élevé de nœuds, de producteurs et de consommateurs dans le monde (une unité d'assemblage industrielle, complexe en diversité de produits finis et/ou approvisionnés peut, à elle seule, représenter des centaines d'« adresses » différentes), l'obtention d'une vision globale de l'intégralité du réseau de l'Internet Physique paraît irréaliste en termes de taille de données nécessaires. De plus la logistique, tout comme l'information, est très sensible aux effets d'échelle et à la gestion de la complexité. Il existe déjà de fait, des structurations des services logistiques suivant la distance ou l'importance des flux. Il est donc intéressant de voir ce que pourrait donner une transposition de la structure de l'Internet vers l'Internet Physique. Un autre point important est la prise en compte de la situation actuelle de la logistique. Cette transposition de la structure d'Internet impose la définition d'un certain nombre de termes par analogie de l'Internet, Cf. Tableau 8.

Tableau 8: Analogies entre Internet et Internet Physique

Niveau	Internet	Internet Physique
Inter réseaux	Partage des transferts de datagrammes	Partage des prestations logistiques conteneurisées
Autorité administrative	—	Par zones de souveraineté
Réseau	Système autonome (SA), réseau géré par une et une seule entité de gestion	Ensemble de schémas logistiques gérés par un acteur (prestataire, industriel ou distributeur) : SA Physique
FAI	Entité donnant un accès à un réseau interconnecté	Prestataire logistique donnant accès à un réseau interconnecté.

Pour autant, un pays (zone de souveraineté) n'est pas un système autonome car il ne se préoccupe pas des prestations logistiques qui seront assurées par des prestataires spécifiques. D'ailleurs, une autorité administrative (pays) n'a pas d'équivalent dans les réseaux informatiques car il n'y a pas de notions de douanes avec des taxations particulières entre pays. C'est une différence majeure qui caractérise les réseaux logistiques physiques aux réseaux informatiques digitaux.

Un système autonome est donc un réseau logistique géré par une entreprise suivant ses propres règles, il peut s'agir d'un opérateur de messagerie, d'un intégrateur logistique international ou d'une entreprise qui gère son réseau d'approvisionnement directement : constructeur automobile ou distributeur par exemple. Tout comme en informatique les SA peuvent avoir ou non une signification géographique. Les SA peuvent donc se superposer géographiquement ou au contraire reposer sur un territoire exclusif comme le montre la Figure 40.

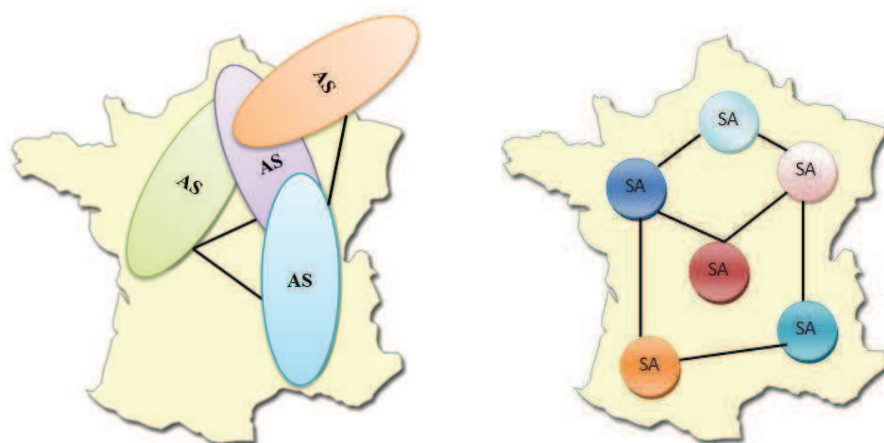


Figure 40: Internet Physique avec une vision géographique des SA (figure à droite), Internet Physique avec une vision purement conceptuelle des SA (figure à gauche). Les échanges de flux entre SA dans ce second cas se font aussi dans les zones d'intersection des SA.

Ainsi on se rend compte, comme dans Internet, que les réseaux de prestations logistiques actuels n'ont pas de localisation géographique précise. Par contre la logique d'interconnexion qui n'est pas géographique pour l'Internet digital, ne pourra pas être reproduite pour l'Internet Physique, sans quoi le gain du partage des moyens logistiques pourrait être limité par des trajets aberrants. En effet, dans le cas de l'Internet, la distance parcourue sur une infrastructure existante compte peu, ce qui n'est pas du tout le cas en logistique.

Si nous cherchons à limiter la connaissance et donc le transfert de données relatives à l'état du réseau physique, pour l'optimisation de son fonctionnement, il est possible de découper un SA physique en de sous-réseaux de plus petites tailles, à l'image d'Internet. D'autre part, un SA physique (qui est un prestataire/opérateur logistique) peut sous-traiter une partie de son réseau à d'autres prestataires/opérateurs. Dans ce cas, on aurait un SA qui interconnecterait d'autres SA, et donc plusieurs niveaux possibles de SA. En résumé, l'Internet Physique est l'interconnexion de SA physiques, qui interconnectent eux-mêmes des sous-réseaux. Ces sous-réseaux, s'ils sont gérés par des acteurs spécifiques, sont des SA à part entière. **Pour une question de simplification, on fait l'hypothèse, qu'un sous-réseau peut être considéré comme étant un Système Autonome (SA), même s'il est géré par la même organisation que celle du réseau auquel il appartient.** On pourrait encore continuer cette décomposition en d'autres sous-réseaux (sous-SA) mais ceci dépendra des besoins réels du transport de marchandises.

De plus, les zones de souveraineté (pays) ont un nombre limité de plateformes internationales d'échanges (aéroports, ports et gares de trains internationaux) notamment pour des questions

de contrôle des flux par les douanes qui représenteraient, dans ce cas, les nœuds « frontières » au sens propre du terme. De plus, chaque pays a ses propres règles de transfert de marchandises et ses propres moyens de transport. Il s'agit là d'une dimension supplémentaire, structurante et absente des réseaux digitaux.

On note évidemment que la fonction de fournisseur d'accès à l'Internet Physique n'existe pas à l'heure actuelle en logistique mais pourrait être assurée par des prestataires de services de proximité notamment pour les particuliers. Sous certains aspects cela pourrait recouper des domaines d'activités des prestataires de type 3PL, 4 PL ou des commissaires de transport.

Ainsi, l'Internet physique serait l'interconnexion fractale de plusieurs réseaux conceptuellement différents et qui peuvent être aussi géographiquement distincts. Ces réseaux pouvant appartenir à des prestataires logistiques déjà existants qui non seulement fournissent des prestations à leurs clients mais peuvent être clients et fournisseurs d'autres prestataires. Ce système existe d'ailleurs déjà dans le transport aérien par le système de *code sharing* ainsi que dans le transport de conteneurs maritimes. Le prochain paragraphe portera sur les impacts d'un concept d'interconnexion de réseaux sur les modèles d'affaires des prestataires logistiques.

3.5 Echange de flux entre opérateurs

Dans Internet on distingue le protocole interne et le protocole externe de routage dans les SA sous la forme de protocoles spécifiques. Les protocoles de routage externe concernent uniquement les hubs qui échangent directement avec les réseaux extérieurs. On parle donc de routeurs « frontières » (routeurs en couleur orange dans la Figure 38, contrairement aux routeurs « internes » au SA qui n'ont pas de visibilité à l'extérieur du SA et qui mettent en œuvre les protocoles internes de routage. Nous définissons les caractéristiques des routeurs « frontières » et « internes » de systèmes (sous-systèmes) (Comer 2006). Ceci implique que tout routeur frontière repose sur des contrats portant sur le trafic entre les opérateurs.

3.5.1 Les échanges de flux d'informations entre opérateurs de l'Internet

La connexion entre deux SA différents se fait nécessairement grâce à des routeurs qui se trouvent à la frontière (Cf. Figure 38). Ces routeurs « frontières » transmettent aux routeurs

« internes » du système en question les datagrammes provenant d'autres systèmes et vice-versa (Hardy et al. 2002).

En parlant d'un SA, on met en relief un opérateur et donc une certaine politique de routage interne et vers l'extérieur. Une politique de routage se traduit par des protocoles spécifiques. A titre d'exemple, un opérateur peut avoir le choix de faire transiter ces paquets de données via un SA particulier pour des questions de coût de revient par exemple. En effet, les échanges entre les SA se font suivant des accords dit de « peering » qui ont pour objectif d'établir dans le cas d'Internet un équilibre dans les échanges, en facturant alors uniquement par exemple le déséquilibre des flux d'informations entre deux SA ou encore le déséquilibre entre leurs niveaux de qualité de connexion (qualité de service). Pratiquement, entre deux FAI (fournisseur d'accès Internet) comparables il n'y a généralement pas de facturation, mais dès qu'il s'agit de deux FAI de tailles différentes, une comptabilité s'impose. Il y a aussi d'autres paramètres qui rentrent en compte dans les négociations de ces contrats de « peering ». En effet, si nous prenons deux FAI A et B et que la connexion de B vers A est d'un très bon niveau de qualité de service, le réseau A risque de perdre son avantage en tant que réseau de bonne connexion et de ne plus être distingué de B. Ainsi, ce genre d'accord prend en compte plusieurs paramètres de divers horizons.

La traduction technique de ces accords se retrouve dans les protocoles de routage utilisés dans les routeurs « de frontières » des SA. Il s'agit de protocoles de type BGP (Border Gateway Protocol), qui sont implémentés sur les routeurs « frontières » et qui garantissent une bonne communication entre SA. Ces protocoles BGP ne prennent pas seulement en compte la politique d'échange entre SA, mais utilisent des règles communes afin d'assurer une bonne communication entre eux. En effet, dans Internet, deux composants ne peuvent communiquer que s'ils utilisent les mêmes protocoles, d'où l'utilisation des protocoles de type BGP entre tous les SA. Plus d'informations sur ces protocoles BGP sont disponibles dans (Hardy et al. 2002).

3.5.2 Les échanges de flux d'informations au sein d'un opérateur de l'Internet

Les routeurs « internes » à un système autonome communiquent grâce à un protocole interne spécifique au SA correspondant. De plus, ce type de routeur n'a connaissance que du réseau intérieur au domaine. Chaque système autonome peut avoir ses propres protocoles de routage dans son système interne : on parle de protocole du type IGP (Interior Gateway Protocol).

A l'image de l'Internet, l'Internet Physique doit pouvoir router des PI-conteneurs entre les différents sous-réseaux et assurer la liberté de chaque opérateur de pouvoir appliquer sa propre politique commerciale et industrielle à son propre réseau.

3.5.3 Les échanges de flux dans Internet Physique

Il est primordial de pouvoir traduire les politiques des prestataires logistiques, tant en interne qu'en externe dans le routage des conteneurs. Comme dans Internet, on peut distinguer des nœuds « internes » et des nœuds « frontières » ainsi que des politiques de routages externes et internes. Voici donc le Tableau 9 représentant cette analogie.

Tableau 9: Eléments d'analogie entre Internet et Internet Physique

Internet	Internet physique	Détails dans l'Internet Physique
Routeurs « frontières »	Hubs ou plateformes « frontières »	Les Nœuds de transit entre un opérateur logistique de l'Internet Physique et un autre opérateur logistique
Routeurs « internes »	Hub « internes » faisant partie du réseau d'un prestataire ou opérateur (SA physique)	Plateformes logistiques appartenant à un opérateur
Protocoles BGP	Protocole de routage de conteneurs entre deux prestataires.	Politique de routage d'un SA physique vers ses partenaires. Définition d'un engagement de qualité de service/client
Protocoles IGP	Protocoles de routage interne à un opérateur	Politique de routage de conteneurs à l'intérieur de son réseau logistique (SA).

Les nœuds « frontières » des SA Physiques :

Ils se trouvent à la frontière des SA physiques (prestataires ou opérateurs) car ils assurent la connexion avec d'autres SA. Ils intégreront, dans la façon de router, les politiques externes de

leurs SA. Leurs fonctions logistiques seraient de router les PI-conteneurs provenant de l'extérieur (du SA correspondant) vers la destination, passant par plusieurs hubs. Leur seconde fonction est de router les PI-conteneurs provenant de leurs SA vers leurs destinations au cas où celles-ci seraient à l'extérieur de leur SA.

Les nœuds « internes » dans les SA Physiques:

Ils traduisent la politique de routage interne de leur SA, et n'ont connaissance que de la partie intérieure du domaine-SA.

Modèles d'affaires :

Nous avons mentionné la question de la redevance liée au partage de flux entre opérateurs et qui a été traitée au départ comme un « simple » échange du fait du coût marginal quasi nul du passage des datagrammes sur une infrastructure existante (accords de *peering*). Cela ne pourra pas être le cas dans l'Internet Physique car tout mouvement de PI-conteneur implique un coût de manutention et de transport non négligeable et des accords de partage de trafics facturés et assurés seront indispensables. Cette question de partage de la redevance n'est pas simple à résoudre car il ne s'agit pas uniquement d'un transfert de coûts mais d'autres paramètres s'imposent différents tels que les jeux de pouvoir entre les prestataires. Sa résolution nécessite l'introduction de notions relatives aux mécanismes de conception des modèles d'affaires, ce qui fait actuellement l'objet d'autres recherches (non abordées ici).

De plus, il se pose un second problème, peu abordé par Internet mais bien connu dans le monde du transport, celui de la responsabilité. Dans ce domaine, la structuration du transport apparaît plus en avance que dans le domaine d'Internet notamment avec les normes des incoterms (International Commercial Terms) qui définissent « *les obligations réciproques du vendeur et de l'acheteur occasionnées par le déplacement des marchandises, sur le triple plan des risques, des frais, et des documents. Ils sont fréquemment remaniés afin de suivre l'évolution des pratiques des entreprises* » (Chevalier et al. 2004). Les incoterms définissent ainsi d'une manière normalisée le partage des responsabilités, assurant ainsi le bon déroulement des échanges de marchandises y compris quand elles transitent par plusieurs transporteurs et manutentionnaires. Pour plus d'informations sur les incoterms, nous invitons le lecteur à se référer à (Chevalier et al. 2004).

Il existe donc des éléments de solutions normalisées pour faire transiter des conteneurs. Nous n'aborderons donc pas davantage le volet juridique de ce genre d'échange. Néanmoins, au

regard de l'impact économique du choix d'un incoterm dans une transaction entre un fournisseur et un client dans une relation commerciale internationale, de la variabilité des taxes appliquées aux activités de transport dans ce genre d'échanges commerciaux, il est nécessaire de préciser l'importance des composantes de ces échanges dans la conception de l'Internet Physique. Par exemple, dans le transport maritime, la CAF (Currency Adjustment Factor), qui représente la couverture du taux de change et la BAF (Banker Adjustment Factor), qui traduit le surcoût du prix du pétrole, doivent être prises en compte dans le choix des schémas logistiques à mettre en œuvre. Il faut souligner que cette thèse ouvre aussi des perspectives de recherche à mener sur les mécanismes économiques à développer pour les futurs modèles d'affaires dans un réseau logistique interconnecté.

Après avoir défini comment seront interconnectés les différents réseaux de prestations logistiques assurant le transit des conteneurs, nous détaillerons dans le prochain paragraphe, les algorithmes de routage (détermination de la route) des marchandises conteneurisées dans le réseau IP, routage qui devra répondre à plusieurs contraintes que nous impose la logistique d'aujourd'hui telles que la garantie des délais de livraison, la qualité de service ou encore la minimisation des prix.

3.6 Le Routage : détermination du meilleur chemin dans un réseau

La détermination de la route des conteneurs de l'Internet Physique revient en pratique à sélectionner une liste de prestations logistiques qui permettront l'acheminement jusqu'à la destination finale. A l'image de l'Internet où les paquets de données transitent d'un routeur à un autre pour arriver à destination, nous voulons trouver des algorithmes de routage adaptés aux contextes de la logistique. Il existe deux grandes familles d'algorithmes dans l'Internet, les algorithmes à vecteur distances et les algorithmes à états de lien. Leur principale différence réside dans la connaissance partielle ou totale des nœuds de l'état du réseau. Ces deux familles d'algorithmes n'empêchent pas l'existence de multiples autres méthodologies pour le routage des paquets de données. Cependant, dans le cadre de l'Internet Physique, on proposera un type de solution qui permettra de répondre à la problématique de routage de conteneurs dans des réseaux de prestations logistiques. Les algorithmes qui seront donc proposés pour l'Internet Physique ne sont pas exhaustifs et laissent la perspective d'en trouver d'autres.

On verra ensuite que router des conteneurs nécessitera d'intégrer des notions quasi-inexistantes dans les réseaux informatiques. Ceci est dû à la quasi-absence du temps de parcours des paquets de données entre deux routeurs, chose inconcevable dans le fret.

L'ensemble de ces éléments fera l'objet du chapitre 4. En effet, cette composante du routage étant un point central de notre travail de recherche, nous avons choisi de lui consacrer un chapitre à part entière.

3.7 Conclusion

Dans de ce chapitre nous avons abordé les premières règles d'un partage de flux entre des réseaux interconnectés. La création d'un système d'adressage, la conteneurisation, la topologie du réseau Internet Physique, les échanges de flux et les modèles d'affaires, et l'algorithme de la détermination de la route, ont été identifiés comme éléments clefs pour l'interconnexion.

Nous avons ensuite choisi d'aborder les notions liées à notre domaine de recherche à savoir le routage et transport des flux: la conteneurisation, la topologie du réseau Internet Physique, les échanges de flux, et l'algorithme de la détermination de la route. Chacun de ces éléments ont été analysés et des solutions ont été proposées, à part l'algorithme de détermination de la route qui fera l'objet du prochain chapitre.

La méthodologie employée était de se baser sur les concepts fondateurs du routage dans Internet, de les analyser et de les adapter au transport de marchandises. Ainsi, le premier concept étudié fut la nécessité de conteneuriser les marchandises pour faciliter le transport, à l'image des conteneurs maritimes.

Puis, nous avons identifié la manière avec laquelle pouvaient se connecter des réseaux de prestations logistiques. Ceci pouvant se faire avec des nœuds qui assureraient l'acheminement des conteneurs par des réseaux intermédiaires. Ces nœuds peuvent être des hubs déjà existants ou de nouveaux qu'il faudrait créer, et leurs fonctions seraient de décharger des conteneurs des moyens de transport lors de leur arrivé, de les décomposer, de les trier, de les recomposer selon les besoins d'expéditions et de les charger dans les moyens de transport adéquats à leurs futures destinations.

Ensuite, nous avons étudié la topologie qu'aurait PI, et nous avons proposé que ce réseau soit l'interconnexion fractale de plusieurs réseaux conceptuellement différents (Systèmes Autonomes) et qui peuvent être aussi géographiquement distincts. Puis, nous avons distingué les politiques de routage des Systèmes Autonomes entre les politiques de routage internes et les politiques externes. Cette distinction est nécessaire car des contrats d'échanges de flux de s'imposent entre les différents prestataires logistiques notamment pour des questions de facturation. Ainsi l'Internet Physique, ne remet pas en cause la multiplicité des acteurs et des prestataires, il permet par contre la consolidation de leurs flux.

Le chapitre suivant est donc dédié à la proposition d'algorithmes de routage des conteneurs dans un Internet Physique.

Chapitre 4 : Routage des conteneurs dans un réseau interconnecté

4.1	Le routage dans Internet.....	105
4.1.1	Classification des algorithmes de routage et Positionnement du routage des paquets de données ..	105
4.1.2	Algorithmes de détermination de la route dans le réseau de l'Internet	108
4.2	Le routage dans l'Internet Physique	113
4.2.1	Exigences du transport de marchandises vis-à-vis des algorithmes de routage	114
4.2.2	Classification des algorithmes de routage et positionnement du routage dans Internet Physique....	114
4.2.3	Algorithmes de détermination de la route d'un conteneur dans le réseau de l'Internet Physique	119
4.3	Conclusion	133

Chapitre 4. **Routage des conteneurs dans un réseau interconnecté**

Après avoir analysé la topologie que pourrait avoir l'Internet physique structuré en des niveaux multiples de systèmes autonomes, avec des échanges de flux conditionnés en conteneurs, nous abordons dans ce chapitre la question de la détermination de la route de ces « paquets physiques » en fonction des besoins de chaque acteur : minimisation des coûts, CO₂, délais. Pour ceci, nous sommes partis des concepts qu'offre Internet pour le routage des paquets de données.

C'est ainsi que le premier paragraphe exposera les méthodologies de routage employées dans Internet. Puis on proposera dans la seconde partie des algorithmes de routage des conteneurs dans l'Internet Physique, via des transpositions et des adaptations au contexte de la logistique.

4.1 Le routage dans Internet

Le routage, d'une manière générale, peut être caractérisé par un ensemble de critères. Une classification possible des routages est proposée ici, et le positionnement d'Internet y est analysé. Ensuite on abordera la question des algorithmes employés par les réseaux Internet pour la détermination de la route des paquets de données qui se fait via la construction et la mise à jour de tables de routages, afin de s'en inspirer et de proposer des algorithmes adaptés à l'Internet Physique.

4.1.1 Classification des algorithmes de routage et Positionnement du routage des paquets de données

On peut classer les algorithmes de routage par trois principaux critères (Rahoual et al. 2006, Pujolle et al. 2008).

Un algorithme de routage peut être « adaptatif », en s'adaptant aux variations de l'état du réseau comme celles de la topologie ou des valeurs des métriques attribuées aux différentes connexions entre les nœuds. A contrario, les algorithmes de routage peuvent être « fixes » (stables) restant insensibles à des éventuels changements de l'état du réseau.

De plus, les algorithmes de routages peuvent être « centralisés » ou « distribués ». Un algorithme « centralisé » est un algorithme dans lequel le chemin est défini par une station de contrôle ou un routeur particulier. Dans ce type d'algorithme, les routeurs communiquent sur leur état avec une station de contrôle qui réalise et modifie les tables de routages pour ensuite les transmettre aux différents nœuds en retour. Pour les routeurs « distribués », la charge de calcul n'est plus centralisée mais répartie entre les différents routeurs du réseau. Chaque routeur met alors à jour sa table de routage suivant la connaissance qu'il a du réseau. Cette connaissance peut être obtenue via différentes méthodes que l'on exposera ultérieurement. Cependant, dans tous les cas, l'obtention de ces informations passe par l'observation par chaque routeur de l'état de ses liaisons avec ses voisins réalisant ainsi des « rapports » qu'il transmet aux autres routeurs. Cette seconde méthode est meilleure pour la fiabilité du calcul qui ne dépend plus d'un point central mais complique l'algorithme et notamment la convergence.

Finalement, les algorithmes de routage peuvent être classifiés par rapport au travail qu'ils exercent au niveau du routeur. En effet, ils peuvent attribuer la prochaine destination (prochain routeur) que doit suivre le paquet de données et dans ce cas on parlera d'algorithme « nœud par nœud » car chaque nœud (routeur) devra réitérer la même procédure pour envoyer le paquet vers la destination suivante. Sinon, les algorithmes peuvent aussi donner lors du traitement du paquet, le chemin entier (depuis le routeur en question jusqu'à la destination finale) que devra suivre le paquet. On parle dans ce cas d'algorithme de « routage de source ». On note que dans Internet, l'algorithme généralement utilisé est le « nœud par nœud ».

Ces trois critères sont les principaux. Il y en a en réalité d'autres mais qui ne sont pas applicables à l'Internet Physique. Il s'agit du routage par inondation ou acheminement aléatoire qui ne prennent pas en compte l'état du réseau et qui se basent sur un principe de duplication des paquets de données pour les envoyer dans plusieurs directions partant du principe qu'il y en aura au moins un qui arrivera à destination. Cet aspect de la duplication est inenvisageable dans le cadre du transport de conteneurs.

Internet : Routage « fixe » ou « adaptatif »

Un routage fixe est techniquement traduit par une table de données fixe ne subissant pas de mise à jour. Ce qui implique que soit l'état du réseau est fixe et que dans ce cas il n'y a plus

besoin de modifier les tables de routage, soit que l'état du réseau change mais qu'on ne la prenne pas en considération dans le routage, ce qui est absurde dans une optique de recherche de trajets optimaux.

Dans le réseau Internet, l'état du réseau peut rapidement changer à cause de défaillances ou de l'introduction de nouveaux éléments. Pour pouvoir router correctement, les tables de routage doivent être corrigées en fonction de l'état instantané du réseau. D'où le choix d'un routage adaptatif.

Internet : Routage « centralisé » ou « distribué »

Dans un routage centralisé, chaque routeur est amené à établir des connexions avec une station de contrôle et il y a donc un risque d'engorgement de celle-ci et un problème de fiabilité (au cas où cette centrale serait en panne ou inaccessible pour certains routeurs). Ce qui fait qu'Internet est un réseau au routage distribué.

Internet : Routage « nœud après nœud » ou routage « de source »

Ayant choisi d'avoir un réseau « distribué », l'utilisation d'un réseau « routage de source » nécessiterait que chaque routeur possède les données liées à l'état de l'ensemble du réseau afin de déterminer l'ensemble du trajet. L'inconvénient de cette méthode est le temps de calcul de la route dans des réseaux complexes. Il y a aussi un aspect stockage de données car chaque routeur doit connaître l'ensemble du réseau auquel il est lié.

Pratiquement, pour les réseaux comportant quelques centaines de nœuds (routeurs), il est préférable d'utiliser le routage de source qui est plus rapide, car le calcul de la route se fait une seule fois. Cependant, pour des réseaux de tailles plus grandes, c'est le routage « nœud après nœud » qui est choisi car sinon il y aura surcharge en mémoire et en temps de calcul au sein des routeurs.

D'où finalement ce choix d'un réseau Internet caractérisé par un routage « nœud par nœud », « distribué » et « adaptatif ». Ces caractères adaptatifs et distribués du réseau Internet permettent ainsi une bonne gestion des ressources du réseau.

La Figure 41 représente un schéma explicatif de ces dernières affirmations et qui positionne le réseau actuel d'Internet.

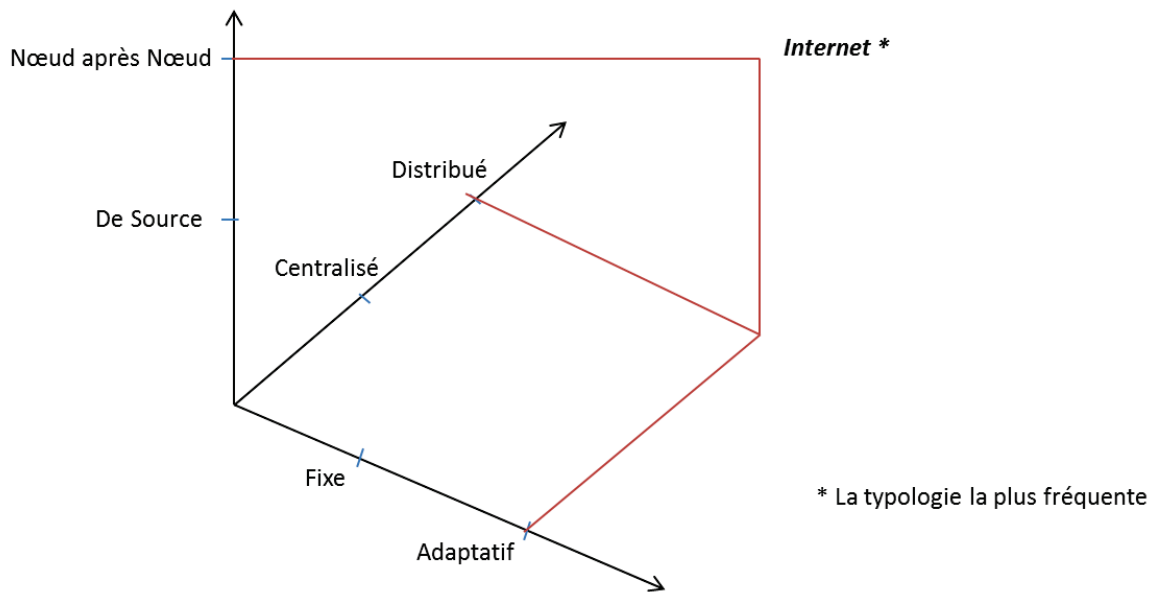


Figure 41: Positionnement du routage de l'Internet dans les classifications générales des types de routages

La mise en œuvre de ce routage nécessite de :

- Construire des bases de données, concernant l'état du réseau, au sein des routeurs.
- Construire via ces bases de données des tables de routage.

Suivant la méthode, la construction des bases de données et des tables de routage peut être plus ou moins imbriquée. Ainsi, on ne parlera que de la construction (ou mises à jour) des tables de routage pour désigner ces deux étapes.

4.1.2 Algorithmes de détermination de la route dans le réseau de l'Internet

Le routage dans le réseau Internet se fait via des tables de routage qui déterminent pour chaque paquet de données, la direction (prochain routeur) à prendre. Nous étudions ici les algorithmes de construction et de mise à jour de ces tables.

Il existe deux grandes familles de routages sur Internet (Toutain 1996):

- ✓ Le routage à vecteurs distance (Distance Vector)
- ✓ Le routage à états de liens (Link State)

4.1.2.1 Routage à vecteur distance

(Huitema 1999, Tanenbaum 2003, Comer 2006) décrivent dans le détail le fonctionnement du routage à vecteur Distance et celui de l'état de liens.

Que ce soit pour l'un ou pour l'autre, l'algorithme construit une table de routage indiquant pour chaque destination le prochain routeur de sorte que le chemin emprunté soit le meilleur suivant un critère donné.

La recherche du meilleur chemin se fait toujours suivant un ou plusieurs critères, appelés généralement coûts ou métriques. Cette métrique peut être le temps, le nombre de sauts, la distance réelle, le délai de transmission, la fiabilité, le coût financier...

Un réseau peut être représenté par un graphe avec des nœuds et des arcs qui représentent les routeurs et leurs connexions directes. (Figure 42).

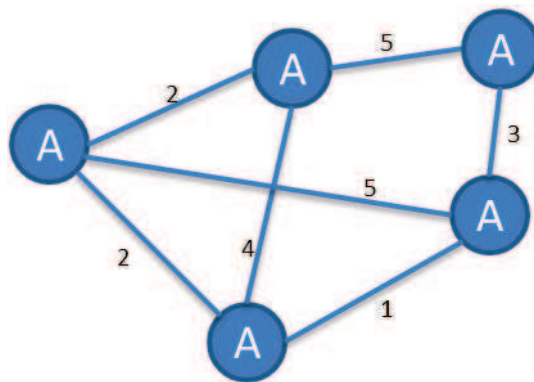


Figure 42: Graphe représentant un réseau de l'Internet; A étant des routeurs

Ainsi, pour chaque connexion directe (arc) il existe une valeur associée à la métrique (On pourrait avoir plusieurs métriques et ainsi une valeur pour chacune d'elle).

Pour chaque routeur il y a une table de routage qui n'est en fait qu'un triplé destination/direction/métrique.

Pour le routage vecteur distance chaque routeur met sa table de routage à jour pas à pas en échangeant des informations (données) avec ses voisins directs. Chaque routeur envoie à chacun de ses voisins, périodiquement, un ou des vecteurs distance (destination, métrique) liés à un changement d'état d'un ou plusieurs arcs du réseau). Lors de la réception de ces vecteurs distances, les routeurs mettent à jours leurs tables de routage. En cas de panne, un routeur n'émettra plus de vecteur distance à ses voisins et au bout d'une période ses voisins intégreront automatiquement l'indisponibilité des connexions les liants à ce routeur (qui est en panne). De même si la panne concerne la connexion entre deux routeurs.

A l'initialisation, un routeur ne connaît que ses voisins directs et leurs tables de routage ne comportent que les métriques (coûts) associés à chacun des voisins directs. Ensuite, chaque routeur va envoyer sa table de routage sous forme de plusieurs vecteurs distance à l'ensemble des routeurs voisins. En recevant les vecteurs distance, chaque routeur mettra à jour sa table de routage en se basant sur les coûts indiqués par l'émetteur. En effet, pour chacune des nouvelles destinations une ligne sera créée dans la table de routage avec comme informations la destination, le prochain routeur à emprunter (qui est l'émetteur du vecteur distance), et finalement le coût associé à la destination. Ce coût (métrique) est calculé à partir du coût indiqué par l'émetteur auquel on ajoute le coût pour atteindre l'émetteur. Cette nouvelle table sera ensuite transmise aux voisins. Ce processus continue en boucle jusqu'à ce que l'ensemble des routeurs ait connaissance de la totalité des destinations du réseau. La périodicité de ce processus permet de garantir sa fiabilité.

Au niveau opérationnel analysons les étapes de la mise à jour des tables de routage. Considérons un routeur R qui reçoit un vecteur distance pour une destination X avec un coût C1 de la part d'un voisin V1 et que cette destination existe déjà dans la table de routage du routeur en question avec un coût C2 en passant via le routeur voisin V2. Dans ce cas, le routeur comparera (Coût de R à V1 + C1) et (C2). Si le minimum des deux est le (C2), rien ne se passera et la table de routage ne changera pas car on cherche la route avec le minimum de coût. Cependant, si le coût minimum est le (Coût de R à V1 + C1), le routeur mettra à jour sa table en changeant le triplet (X, V2, (C2)) par (X, V1, (Coût de R à V1 + C1)).

Ainsi en envoyant régulièrement le contenu des tables de routage et en mettant à jour ses tables uniquement lors de la réception de vecteurs présentant des solutions moins coûteuses, cet algorithme permet de découvrir le meilleur chemin pour chaque destination. Il s'agit du fonctionnement général de la mise à jour dans les routeurs du réseau Internet.

Avantages de l'algorithme Vecteur Distance

- ✚ Simplicité de l'algorithme (charge CPU faible)

Inconvénients

- ✚ Besoin de mises à jour fréquent
- ✚ Taille des informations de routage proportionnelle au nombre de routeurs dans le domaine
- ✚ Coût standard des routes externes aux SA. En effet, le fait que le réseau soit découpé en différents sous-réseaux pour diminuer les dimensions des tables de routage on aura l'inconvénient de ne pas avoir une vision complète du réseau et donc de ne pas pouvoir connaître le coût exact pour une destination extérieure au SA.
- ✚ Lenteur de convergence pour les grands réseaux
- ✚ Les routeurs envoient l'ensemble de la table de routage et non pas seulement les nouveaux changements (envoi périodique)
- ✚ Pas de chemin alternatif en mémoire.

4.1.2.2 Routage par information d'états de liens

Cet algorithme se différencie de celui de vecteur distance car chaque routeur communique à l'ensemble des routeurs du réseau l'état de ses liens avec ses voisins directs.

A l'initialisation, chaque routeur découvre ses voisins directs et mesure le coût pour les atteindre. Il envoie ensuite ces données à l'ensemble des routeurs du réseau. Ainsi, si un routeur X est en liaison directe (voisin) avec les routeurs Y et Z et que le coût pour les atteindre à partir de X est de CY pour Y et CZ pour Z, le routeur X enverra à l'ensemble du réseau les informations suivantes : (X, Y, CX) et (X, Z, CZ).

Ainsi, chaque routeur peut connaître l'ensemble des liaisons directes et a ainsi une vision complète sur l'état du réseau. Le Tableau 10 donne un aperçu d'une telle base de données qui représente la cartographie du réseau.

Tableau 10: Exemple de base de données d'un routeur

Origine	Destination	Métrie
Routeur A	Routeur B	2
Routeur A	Routeur C	4
Routeur B	Routeur D	1

Ensuite, l'algorithme se base sur ces données pour calculer, pour chaque nœud (routeurs), le plus court chemin. En effet, il suffit d'appliquer un algorithme de recherche du plus court chemin comme l'algorithme de Dijkstra (Bellman 1958, Dijkstra 1959, O'Cearbhaill et al. 2005).

Ainsi, pour chaque destination, l'algorithme est capable de connaître le chemin complet mais seul le routeur prochain est mémorisé car, au point de vue du routeur d'origine, c'est la seule information dont il a besoin vu qu'Internet se veut un réseau « nœud à nœud ».

Il n'y a pas de diffusion périodique des tables de routage, mais seulement diffusion des informations liées aux changements des états de connexions.

Avantages

- ✚ Calcul des informations de routage de façon indépendante
- ✚ Convergence rapide
- ✚ Possibilités de chemins multiples
- ✚ Métriques précises grâce à la rapidité de la convergence et couvrant plusieurs besoins
- ✚ Les messages ne concernent que les liens directs entre routeurs et ne sont donc pas proportionnels au nombre de routeurs dans le domaine (contrairement à l'algorithme vecteur-distance qui envoie à chaque fois l'ensemble des tables de routages aux voisins). Ainsi, les algorithmes à états de liens sont mieux adaptés au facteur d'échelle que les algorithmes vecteur-distance.

Inconvénients

- ✚ Complexe (mise en œuvre)
- ✚ Consommation de ressources (mémoire et calcul) plus importante car à chaque changement de l'état du réseau, chaque routeur doit de nouveau appliquer l'algorithme du calcul du meilleur chemin pour chaque destination de sa base de donnée. De plus, l'algorithme permet de donner beaucoup plus d'informations que simplement la prochaine destination.

4.1.2.3 L'état de l'art des algorithmes de construction de table de routage dans Internet

Actuellement les deux algorithmes existent car chacun à ces propres avantages. En effet, la simplicité de l'algorithme à vecteur distance fait qu'il est très utilisé aujourd'hui, même si cette méthode est de plus en plus délaissée au profit de l'algorithme à états de liens

principalement à cause de la lenteur de convergence. De plus, à chaque mise à jour c'est l'ensemble des tables de routages qui est transmis car il n'y a pas de sélection de données à envoyer. Ce qui dégrade *in fine* les performances du réseau car les tables sont transmises par Internet (Comer 2006, Pujolle et al. 2008).

En résumé, l'algorithme à vecteur distance est plutôt adapté à des réseaux de taille plus réduite vu la quantité des informations qui transitent, alors que l'algorithme à état de liens est plus adapté à des réseaux de plus grande taille dans la mesure où les routeurs ont des capacités de mémoire et de calcul plus performantes. En effet, l'algorithme à Vecteur Distance a tendance à surcharger le réseau alors que l'algorithme à états de liens a plutôt tendance à surcharger les routeurs de calculs. De plus, dans les réseaux internet, afin de limiter la taille des informations à transiter et de soulager la charge de calcul des différents routeurs, on fait appel à une organisation hiérarchique sous formes de plusieurs réseaux.

Ainsi, suivant les capacités CPU (*Central Processing Unit*) que l'on a et la taille du réseau, on décide comment doit être découpé ce réseau en sous-réseaux et l'algorithme de routage à utiliser. La contrepartie du découpage du réseau en sous-réseaux est la nécessité de passer par les routeurs « frontières » ce qui réduit l'optimisation des chemins parcourus par les paquets.

Après avoir présenté les différentes solutions de routage, analysé et évalué les algorithmes de détermination des chemins les plus utilisés dans Internet, nous consacrerons le prochain paragraphe à la proposition de concept de routage des conteneurs dans l'Internet Physique.

4.2 Le routage dans l'Internet Physique

Cette partie concerne le développement de modèles de routage des conteneurs et représente le travail de réflexion réalisé à partir d'Internet et des besoins que nous impose le transit de conteneurs physiques et non de paquets de données.

Ainsi, on exposera les exigences que devra supporter un tel réseau physique en termes de routage. Ensuite, on partira des techniques existantes dans Internet et on proposera de nouveaux algorithmes pour la détermination de la route des conteneurs.

4.2.1 Exigences du transport de marchandises vis-à-vis des algorithmes de routage

La construction d'un tel modèle de l'Internet Physique nécessite tout d'abord d'étudier ses exigences en tant que réseau de prestations logistiques. Nous proposons ainsi une série d'exigences possibles envers le routage, tirés du quotidien de la logistique et des exigences actuelles du transport de marchandises :

- Minimisation d'une ou plusieurs métriques (temps, coûts, etc.).
- Possibilité d'exiger en plus une date limite d'arrivée.
- Possibilité d'exiger aussi une connaissance préalable (depuis la source) de l'ensemble du chemin qu'emprunteront les conteneurs.

On ne prend pas ici en compte le type de marchandises. En effet, dans le concept de l'Internet Physique, les marchandises sont encapsulées dans des conteneurs standardisés. On ne s'occupe ici que du routage des conteneurs sans se préoccuper de leurs contenus. Il va cependant de soi que c'est un aspect qui devra être traité ultérieurement car la conteneurisation ne suffit pas nécessairement à gommer toute différence et des précautions, limitations ou formalités peuvent subsister.

Pour cela, nous avons choisi de partir des différentes classifications de routage, de les analyser une à une, d'essayer de les transposer dans le cas du transport de marchandises en reportant aux attentes de la logistique traduites par les exigences que l'on a défini envers le routage.

4.2.2 Classification des algorithmes de routage et positionnement du routage dans Internet Physique

A l'image du routage dans Internet qui est « nœud à nœud », « distribué » et « adaptatif », nous allons étudier dans cette partie le positionnement du routage de l'Internet Physique.

La notion du transport de marchandises diffère largement de celle des paquets de données, ce qui impose l'intégration d'une nouvelle dimension dans la classification du routage. Il nous faudra définir cette nouvelle dimension puis analyser les classifications retenues pour le routage dans PI.

4.2.2.1 Le routage dans un réseau de prestations logistiques, nouvelle dimension à considérer : le délai

Nous avons présenté précédemment une classification possible des différentes typologies d'un routage. En effet, nous rappelons qu'un routage, quel qu'il soit, peut être basé sur trois critères:

- ✓ Routage « adaptatif » ou « fixe ».
- ✓ Routage « centralisé » ou « distribué ».
- ✓ Routage « nœud à nœud » ou « routage de source ».

Dans le cas de l'Internet Physique, le routage se fait dans un réseau de prestations logistiques. Ainsi, deux nœuds (deux hubs) peuvent être directement connectés par plusieurs prestations de transports avec des transporteurs, des moyens (train ou camion), des horaires, etc. différents. Ceci contrairement à Internet où entre deux nœuds il existe uniquement une connexion en continue. Dans Internet, la détermination d'une route revient à sélectionner une liste de nœuds, alors que dans un PI, elle reviendrait à sélectionner une liste de prestations logistiques, ce qui implique qu'elles soient combinables. En effet, il est nécessaire par exemple, que la seconde prestation de transport prévue commence après que la première soit finie. Alors que dans Internet, la notion du temps est quasi-nulle, on voit bien le niveau de difficulté additionnel qu'impose le routage dans la logistique.

Ainsi router dans le cadre de l'Internet Physique paraît plus complexe que celui d'Internet vu la notion du « délai » qu'il faut intégrer lors de la prise de décision. En effet, si on voulait représenter un réseau de prestations logistiques via un graphe, on aurait, entre deux nœuds, plusieurs arcs qui apparaîtraient puis disparaîtraient en fonction de l'évolution des prestations qu'elles représentent. On n'est plus dans le cas de l'Internet où le réseau est considéré comme permanent. On parle donc de routage dans un réseau « ad-hoc » en référence au caractère non permanent car temporel et adaptable à la demande des prestations (et donc des arcs dans le graphe). Les prestations de transport sont personnalisées avec des paramètres spécifiques (lieux, heure de départ, heure d'arrivée, capacité à un instant T, etc.).

Une hypothèse de modélisation peut être considérée pour simplifier le routage dans un tel réseau. A ce titre, si l'on considère que les prestations de transport entre deux nœuds sont permanentes, avec des transports fréquents, nous pourrions modéliser l'ensemble de ces prestations par un schéma logistique. Ceci reviendrait à standardiser les métriques par couples de nœuds (origine, destination) et par mode de transport. Dans ce cas, on ne parlerait plus

d'un réseau de prestations mais d'un réseau de schémas logistiques. Dans le cadre de la représentation du réseau en graphe, chaque arc fera donc référence à un schéma logistique, à l'image des connexions permanentes dans Internet. On retrouve cette modélisation du réseau dans les entreprises postales telles que DHL ou LAPOSTE qui considèrent des prix et des délais fixes indépendamment de l'état réel des prestations. Une telle hypothèse reviendrait à considérer un routage dans un réseau « permanent ».

Ainsi, nous ajoutons une nouvelle dimension dans les typologies d'un routage en logistique : un routage dans un réseau « permanent » VS un routage dans un réseau « ad-hoc ». Il est à noter qu'une prestation de transport est par nature non permanente. Cependant, sur les grands axes (routier, ou ferroviaire) nous trouvons une multitude de prestations en « continue », ce qui peut justifier l'hypothèse de réseaux quasi-permanents. C'est le cas par exemple de l'axe Nord-Sud (Tableau 11).

Tableau 11: Trafic moyen journalier en unités de poids lourds (véhicules classes 3 et 4) - INSEE

	2008	2009	2010
A10 - Pons	3 510	2 932	3 044
RN10 - Reignac	8 629	8 269	8 635
RN10 - Magescq	8 696	8 751	8 993
A63 - Biriattou	8 383	8 383	8 383

Dans le cadre de la représentation des réseaux logistiques en forme de graphe, les arcs auraient donc des significations différentes selon que le réseau soit considéré comme « permanent » ou « ad-hoc » (les nœuds représentant les hubs). Dans le cas d'un réseau considéré « permanent », chaque arc entre deux nœuds du réseau représentera un schéma logistique et fera donc référence à un type de moyen de transport (camion, ou train, etc.), avec pour chacun des caractéristiques standards: prix, délais, etc. Contrairement à un routage « ad-hoc » dans lequel chaque arc représentera une prestation logistique particulière (Tableau 12). Ainsi déterminer la route revient à sélectionner une liste de schémas logistiques dans un réseau « permanent » et une liste de prestations de transports dans un réseau « ad-hoc » potentiel. Mais dans les deux cas, il s'agit de sélectionner une liste d'arcs.

Tableau 12: Représentation en graphe d'un réseau logistique: Signification des nœuds et des arcs

Eléments du graphe	Composantes
Nœud	Fournisseur, consommateur, et tous sites logistiques (PI-hubs, entrepôts, etc.)
Arc	Dans un réseau permanent Schéma logistique
	Dans un réseau ad-hoc Prestation de transport

4.2.2.2 Propositions d'un positionnement du routage pour l'Internet Physique

Il faut maintenant étudier chacun de ces critères et décider, en se basant sur les besoins de l'Internet Physique, la ou les classifications à retenir pour le routage des PI-conteneurs.

Considérons un arc entre deux nœuds. Selon qu'il s'agisse d'un réseau « permanent » ou « ad-hoc », il peut soit représenter un schéma logistique soit une prestation particulière. Dans les deux cas, un arc sera caractérisé par un prix, un délai, des émissions en CO₂, etc. Si on considère que le routage est insensible aux variations de l'état du réseau, et donc à la suppression de certains arcs ou à même des changements de prix, délais, etc., on parle de routage « fixe ». A contrario, le routage « adaptatif » prend en compte les changements dans les états du réseau. A ce titre, il est plus raisonnable de considérer un routage « adaptatif » car le transport de marchandises n'est pas à l'abri de variations concernant sa disponibilité, ses délais ou ses prix.

Concernant la modélisation du réseau (« permanent » ou « ad-hoc ») que l'on peut considérer pour le routage, l'avantage du « permanent » est certainement la simplicité de son fonctionnement. Il ne prend cependant pas en compte l'état réel du réseau mais se base sur des considérations standardisées (coûts, délais, émissions, etc.). A titre d'exemple, dans ce cas, le chemin le moins coûteux ne prend pas en compte les taux de remplissage réels des moyens de transport. Alors que le routage « ad-hoc » pourrait en prendre acte car il permettrait de transférer les données relatives à l'état réel du réseau.

Cependant, le routage « ad-hoc » nécessite un système d'information globalisé dans lequel des informations concernant les nœuds du réseau (capacité de transit, de stockage, etc.) ainsi que les prestations logistiques (position des moyens de transport, plans de chargement etc.) doivent être stockées et mises à jour régulièrement. Il faudrait donc définir un véritable système de réservation ou d'affectation de ces capacités. A contrario, dans un réseau « permanent » on peut considérer des métriques fixes comme des prix de prestations (exemple : prix du transport déterminé par km, par tonnes et par mètre cube), ou des délais globalement prédéfinis.

Ainsi, nous pouvons penser qu'une première implémentation de l'Internet Physique se ferait dans le cadre d'un réseau considéré « permanent », facilitant ainsi son implémentation.

D'autre part, le routage peut être « centralisé » ou « distribué ». Comme pour Internet, dans un routage « centralisé » chaque nœud doit établir des connexions avec une station de contrôle, il y a donc risque d'une surcharge de celle-ci, un problème de fiabilité (au cas où cette centrale serait en panne ou inaccessible pour certains nœuds) mais aussi un problème de vulnérabilité. Il est donc préférable que le routage dans l'Internet Physique soit « distribué ».

Toutefois, le fait de vouloir connaître le chemin complet depuis la source jusqu'à la destination et que l'Internet Physique ait une topologie hiérarchique en systèmes autonomes, impose que le routage ne peut pas être uniquement distribué. En effet, dans une topologie hiérarchisée avec des SA, les routeurs internes n'ont qu'une vision locale du réseau. Ils ne peuvent donc pas, sans communication avec d'autres éléments, déterminer les chemins complets de leurs expéditions à l'extérieur du SA correspondant. Il est à noter que dans Internet, le problème ne se posait pas car on n'a pas la même exigence d'identifier le chemin depuis la source, et qu'un routage « distribué » suffit.

On verra donc par la suite que le routage dans Internet Physique sera un mix de routage « centralisé » et « distribué ».

Finalement, la quatrième dimension concerne le choix entre un « routage de source » ou un routage « nœud à nœud ». Un « routage de source », par définition, permet d'affecter le chemin complet depuis la source. Contrairement à Internet, il est extrêmement important d'avoir la certitude de l'existence d'un chemin pour assurer que la marchandise qui est expédiée dispose d'une solution acceptable. Il se peut même que l'expéditeur ait des exigences sur le chemin. Le routage y sera donc « de source ».

Le « routage de source » permettra de connaître le chemin complet depuis la source. On verra cependant que ce type de routage n'empêche pas la possibilité de remettre en cause le chemin initialement choisi en cours d'acheminement.

Nous avons ainsi déterminé les typologies retenues du routage des PI-conteneurs dans le réseau de l'Internet Physique. On constate que les solutions retenues ne correspondent pas à celles de l'Internet. On verra cependant que les algorithmes de détermination de la route utilisés dans Internet et présentés dans le paragraphe 3.3.1.2, permettent également de proposer des modèles adaptés au routage des conteneurs.

4.2.3 Algorithmes de détermination de la route d'un conteneur dans le réseau de l'Internet Physique

Dans Internet, le routage repose sur la construction et la mise à jour des tables de routages. En transposant ce concept, on aurait aussi dans Internet Physique une table de routage dans chaque nœud qui donnerait la direction à suivre pour chaque conteneur. Dans un premier temps, nous démontrerons la non-viabilité d'une telle simple-transposition, vis-à-vis des exigences de l'Internet Physique. Ensuite, nous analyserons les algorithmes utilisés dans Internet pour la construction de ses tables de routage, et démontrerons que des modifications à ce niveau permettent de proposer des algorithmes de routage adaptés aux conteneurs physiques.

4.2.3.1 Inadéquation des tables de routage à l'Internet Physique

Dans Internet Physique, nous avons besoin de pouvoir connaître le chemin complet des conteneurs depuis la source. Ceci est en contradiction avec le concept même d'une table de routage qui donne uniquement la prochaine destination (destination /direction / métrique). C'est ainsi qu'une transposition simple du routage dans Internet n'est pas viable dans l'Internet Physique.

Cependant, même si on ne retient pas ce concept de table de routage pour l'Internet Physique, on verra par la suite que les algorithmes à états de liens utilisés pour leurs constructions dans Internet sont intéressants à transposer dans le cadre de la logistique. En effet, le fonctionnement de cet algorithme repose sur deux étapes: la première implique que chaque nœud ait une cartographie complète du réseau auquel il appartient (au système autonome), et la seconde applique un algorithme de recherche du plus court chemin (tel que Dijkstra) au

niveau du nœud source. Ce type de méthodologie permet de connaître le chemin complet depuis la source.

Ce n'est pas le cas des algorithmes à vecteurs distances, dans lesquels chaque routeur met sa table de routage à jour pas à pas en échangeant périodiquement des informations (sous forme de vecteurs distances) avec ses voisins directs. En effet, cet algorithme ne permet pas aux nœuds d'avoir une vision globale du réseau auquel ils appartiennent, d'où l'impossible détermination du chemin complet depuis la source. De plus, il ne permet pas de gérer des expressions de critères de routage différents. Par exemple, un expéditeur peut chercher non seulement le coût le plus bas, mais a aussi une date limite d'arrivée qui lui est propre.

C'est ainsi que l'on élimine les algorithmes à vecteurs distances inadaptés aux attentes de l'Internet Physique. Nous nous concentrons donc sur les apports d'une transposition des algorithmes à états de liens au contexte du transport des conteneurs.

4.2.3.2 Proposition d'un algorithme de routage dans l'Internet Physique

La détermination de la route d'une façon partielle ou totale au niveau d'un nœud du réseau PI nécessite des échanges d'informations intra et inter systèmes autonomes, ce qui a tendance à complexifier les algorithmes. De plus, le routage des conteneurs physiques ajoute un niveau de difficulté supérieur à celui de données, car une nouvelle dimension s'impose à savoir la modélisation du réseau. En effet, dans le cas d'un réseau « ad-hoc », la détermination de la route n'est plus de trouver la liste des nœuds intermédiaires mais la liste des prestations logistiques possibles et qu'il faut coordonner.

Nous avons donc choisi de simplifier notre problématique dans un premier temps en considérant que PI a un unique système autonome avec un réseau « permanent ». En termes de performance, il s'agit d'une hypothèse conservatrice.

Nous étudierons donc tout d'abord le routage avec un SA et un réseau considéré « permanent », puis nous compléterons ce travail par des perspectives d'adaptation de nos solutions à un réseau structuré en plusieurs SA et avec une partie « ad-hoc ».

4.2.3.2.1 Etude d'un cas particulier : réseau interconnecté avec un seul système autonome « permanent »

Nous allons ici partir de la seconde grande famille des algorithmes de construction des tables de routages dans Internet, à savoir les algorithmes à états de liens, pour proposer un routage pour l'Internet Physique.

Pour le routage à états de liens, on rappelle que chaque nœud communique à l'ensemble des nœuds du SA l'état de ses liens avec ses voisins directs. Dans cet algorithme, il n'y a pas de diffusion périodique des tables de routage, mais seulement diffusion des informations liées aux changements des états des arcs.

Chaque nœud peut ainsi connaître l'ensemble des liaisons directes du SA ce qui lui permet une vision complète sur l'état de ce réseau. Ensuite, un algorithme qui reste à définir se base sur ces données pour calculer, pour chaque nœud, le plus court chemin suivant une ou plusieurs métriques.

Ainsi, pour chaque expédition de conteneur vers une destination, l'algorithme est capable de connaître le chemin complet depuis la source. Dans Internet, même si le nœud est capable de connaître l'ensemble du chemin, il garde en mémoire uniquement le nœud prochain car on est dans le cas d'un routage « nœud à nœud ». Ce ne sera pas le cas dans l'Internet Physique, car on gardera en mémoire l'ensemble du chemin trouvé. Les chemins calculés seront associés aux conteneurs qui les enregistreront. Ceci peut se faire par exemple via des puces RFID implantées dans les conteneurs ou un service sur Internet. Ainsi, pour chaque passage d'un conteneur au niveau d'un nœud, il sera orienté vers la prochaine destination grâce aux données enregistrées. Ceci n'exclut pas cependant pas la possibilité de remettre en cause la route du conteneur et de recalculer un nouveau chemin.

Ainsi, au niveau de chaque nœud du réseau, on aurait un accès à une base de données représentant le réseau du SA, auquel des algorithmes de recherche du meilleur chemin seraient appliqués. Il est à noter que ce type d'algorithme ne peut être efficace que s'il y a convergence rapide et qu'il n'y a pas beaucoup de changements. Car, sinon, les chemins calculés seront biaisés. Ce type de solution n'est pas acceptable dans le cadre des réseaux informatiques car les états du réseau évoluent vites et des problèmes de convergences sont souvent posés. C'est ce qui explique entre autre que seul le prochain nœud est retenu. Par contre, dans les réseaux logistiques, la question de convergence est moins problématique vu que l'on peut connaître à l'avance l'état du réseau via des prévisions, et que sauf aléa, il n'évolue pas à l'échelle de temps du transport d'un conteneur. Ces dimensions de rapidité des

changements de l'état des réseaux et de son caractère général, constituent une différence notable entre les deux types de réseaux : informatiques et logistiques. Ainsi, dans le cadre de l'Internet Physique, on peut considérer que la convergence ne représente pas un frein à l'efficacité d'un tel algorithme de routage (algorithmes à état de liens).

Mise à part la nécessité de pouvoir connaître le chemin depuis la source, le transport de marchandises peut imposer d'autres contraintes comme fixer une date limite d'arrivée des conteneurs à destinations ou encore chercher à minimiser plusieurs métriques en même temps : coût, délai, émissions. L'intérêt de l'algorithme à état de liens est justement sa capacité à résoudre des problèmes multicritères (métriques) et multi-contraintes ; problème classique du meilleur chemin avec plusieurs contraintes et métriques à minimiser.

Il suffit, en effet, d'avoir une base de données qui prenne en compte l'ensemble des métriques dont on a besoin et qui aurait la forme présentée dans le Tableau 13, et d'y appliquer ensuite un algorithme et les contraintes nécessaires.

Tableau 13: Exemple de base de données de routage dans un nœud du réseau PI

Origine	Destination	Métriques 1	Métrique 2	Métrique 3
Nœud A	Nœud B	2	4	9
Nœud C	Nœud D	4	6	4
Nœud B	Nœud C	1	8	2

L'avantage d'une telle méthodologie est que la détermination de la route se fait d'une manière individuelle et personnalisée pour chaque PI-conteneurs, contrairement aux concepts des tables de routages. Ce qui permet d'ailleurs la flexibilité requise pour transporter ensemble des conteneurs aux contraintes différenciées.

Cet d'algorithme répond favorablement aux différentes exigences du routage que l'on a défini.

Avantages du modèle inspiré de l'algorithme à états de liens

- ✓ Calcul des informations de routage de façon indépendante
- ✓ Convergence rapide
- ✓ Possibilités de chemins multiples grâce à l'algorithme
- ✓ Métriques précises grâce à la rapidité de la convergence et couvrant plusieurs besoins.

- ✓ Les messages ne concernent que les liens directs entre nœuds et ne sont donc pas proportionnels au nombre de réseaux dans le domaine (contrairement à l'algorithme Vecteur-Distance qui envoie à chaque fois l'ensemble des tables de routages aux voisins). Ainsi, les algorithmes à états de liens sont mieux adaptés au facteur d'échelle que les algorithmes Vecteur-Distance.
- ✓ Seules les nouvelles informations sont transférées aux autres nœuds du réseau.

Inconvénients et améliorations du modèle inspiré de l'algorithme à états de liens

- ✓ Complexité de l'algorithme (charge CPU élevée).
- ✓ Dans le cas d'un système « adaptatif » (notre cas), consommation de ressources (mémoire et calcul) plus importante car à chaque changement d'état, chaque nœud doit de nouveau appliquer l'algorithme du calcul du meilleur chemin pour chaque destination de sa base de données. De plus, l'algorithme permet de donner beaucoup plus que la simple prochaine destination. Ce qui limite la dimension des réseaux pour lesquels on voudrait appliquer ce type d'algorithme.
- ✓ Métriques standards des routes externes aux SA. En effet, le réseau étant structuré sous formes de plusieurs sous-réseaux, on n'a pas de vision complète du réseau et on ne connaît donc pas le coût exact pour une destination extérieure au SA.

Ce paragraphe nous a permis de proposer un modèle de routage s'inspirant de la méthode des états de liens, et aussi de tirer un bilan de cette méthode. Le modèle proposé permet de répondre à différents types de demandes, traitant des problèmes avec plusieurs critères de routage actifs en parallèle suivant la priorité de chaque conteneur. C'est ce routage qui sera testé par la suite dans le modèle de simulation.

Nous avons convenu, précédemment, qu'Internet Physique aurait une topologie hiérarchique formée de plusieurs réseaux (SA), et que son réseau était en réalité « ad-hoc ». La question est donc de savoir comment adapter notre modèle (algorithme) de routage à une telle topologie de réseau et dans un réseau « ad-hoc ».

4.2.3.2.2 Adaptation au cas général : Réseau PI avec une hiérarchisation en plusieurs SA et dans un réseau « ad-hoc »

Nous avons proposé un algorithme de routage dans le cadre d'un Internet Physique structuré en un seul Système Autonome et un réseau considéré « permanent ». Revenons maintenant à ces hypothèses et analysons:

- Comment cet algorithme devra fonctionner dans un réseau « ad-hoc » ?
- Comment il devra s'adapter à une hiérarchisation de PI en plusieurs niveaux de SA ?

4.2.3.2.2.1 Comment l'algorithme retenu devra fonctionner dans un réseau « ad-hoc » ?

Pour répondre à cette première question, on considère à ce stade, un réseau complètement ouvert et non hiérarchique dans lequel les informations sont transférées à tous les nœuds sans limitation de zone. La hiérarchisation sera abordée juste après.

Le fait que le réseau soit « ad-hoc » veut dire que l'on considère les états réels des prestations, voire qu'on en aura suscitées. Ce réseau réintroduit la notion de temps. Dans Internet, lors du calcul de routage pour une destination donnée, quelle que soit la méthode utilisée, le nœud travaille sur une base de donnée de l'instant T. Ainsi, en cherchant par exemple le chemin le moins coûteux, le calcul se fera sur l'état du réseau à l'instant T. Cette hypothèse de travail est justifiable dans Internet car les métriques sont approximatives (standardisées hors le SA du nœud source), et que la perte d'un paquet de données n'est pas grave vu la possibilité de le rééditer. En d'autres termes, lors du routage d'un paquet de données, le nœud se base sur des données d'un réseau dont les états sont supposés fixes. C'est comme si la notion du temps n'existait pas le long du parcours. Chose tout à fait inexacte pour le transport de marchandises, car toute opération logistique est consommatrice de temps. En effet, un chemin calculé sur la base d'un « faux » réseau de prestations, est biaisé d'avance.

Nous rappelons que ce modèle repose sur deux concepts : la base de données au niveau de chaque nœud, qui donne l'ensemble des états des liens du réseau (SA), et l'algorithme de recherche du meilleur chemin et qui sera appliqué sur cette base donnée. Nous analysons donc ici les adaptations de ces deux concepts à un Internet Physique avec un réseau « ad-hoc ».

Les bases de données et leurs mises à jour

Concernant la base de données, on propose des bases sous le modèle proposé par le Tableau 14:

Tableau 14: Modèle de base de données de routage pour un nœud du réseau Internet Physique

Orig.	Dest.	Id prest.	Heure d'arrivée max.	Heure d'acceptation mini.	Types conteneur	Coût horaire stock	Coût transport (métrique)	Temps Transport (métrique)	Autres métriques
Nœud A	Nœud B	38902	11h00	03h00	1, 8, 12	x€	y€	10h00	...

Chaque ligne de ce type correspond à une prestation de transport particulière, définie via les données suivantes:

- Origine : le Hub de départ de la prestation du transport (Nœud qui contient cette base de données)
- Destination : le Nœud de destination de cette même prestation, ce qui implique que ce nœud destination soit forcément un voisin direct au nœud d'origine. (en tout cas au moment de cette prestation)
- Id prestation : Il s'agit d'un numéro unique accordé à une prestation. Il sert lors de la mise à jour de la base de données pour identifier la prestation en cas de changement d'une caractéristique comme le coût par exemple ou signaler un retard.
- Heure d'arrivée maximale : heure d'arrivée maximale possible pour les conteneurs voulant bénéficier de cette prestation de transport, qui prend en compte l'heure de départ du moyen de transport du nœud physique, mais aussi le temps de manipulation nécessaire entre l'arrivée d'un PI-conteneur au sein du Nœud et son traitement jusqu'à son départ via le moyen de transport.
- Coût manutention : Il s'agit du coût de stockage des conteneurs dans le nœud d'origine. En effet, lors de la réception d'un PI-conteneur, en général le nœud n'aura pas à disposition directement le moyen de transport. Mais, il faudra stocker ces conteneurs jusqu'à l'arrivée du moyen de transport.
- Heure d'acceptation minimale : Heure à partir de laquelle, le nœud physique peut réceptionner les PI-conteneurs pour la prestation en question. Si une prestation de transport est proposée à un moment T, l'heure d'acceptation minimale correspondrait à une limite de temps en dessous de laquelle le nœud ne pourra pas réceptionner les conteneurs pour une raison d'impossibilité de stockage par exemple.
- Types conteneurs : Il s'agit des différentes familles de conteneurs que le nœud accepterait pour cette prestation particulière.
- Coût transport : C'est un exemple de métrique qui est nécessaire pour le calcul du coût de revient du transport. Il s'agit du coût relatif uniquement à la prestation de transport. Il peut être un coût par unité de masse, de volume, par conteneurs, par type de transport, etc...

- Temps transport : Il s'agit là aussi d'une métrique nécessaire, qui représente le temps alloué au transport.
- Autres métriques : comme les émissions en CO₂, etc.

D'où la base de données serait composée de plusieurs prestations comme celles-ci (une prestation correspond à une ligne). Contrairement à Internet, entre deux nœuds on peut avoir plusieurs arcs (chacun correspond à une ligne dans la base de données) représentant des prestations de transports différents, ex. horaires différents.

Les mises à jour de ce type de base de données se fait via l'envoi d'informations sous la forme (Origine, Destination, Id prestation, Heure d'arrivée maximale, Coût horaire stock, Coût transport (métrique), Temps Transport (métrique), Métrique3, etc.), à l'ensemble des nœuds du SA. L'Id prestation permettra de mettre à jour les données relatives à une prestation déjà existante (changement dû à un retard, une panne, etc.), ou d'intégrer une nouvelle prestation.

Ce modèle de base de données ressemble à une bourse de fret dans la mesure où les nœuds mettent en relation divers acteurs du transport pour massifier les flux et réduire ainsi les coûts. Cependant, contrairement à la bourse de fret, nous allons proposer un algorithme de routage qui permette de juxtaposer, depuis la source, une liste de prestations logistiques en prenant en compte les durées de chacune.

L'algorithme de routage

Une fois le modèle de base de données défini, il reste maintenant à décrire le fonctionnement d'un algorithme de routage adapté à un réseau « ad-hoc ».

Le fonctionnement d'un algorithme de calcul de routage tels que Dijkstra ou A* (Fu et al. 2006), se base sur un principe de découverte pas à pas des nœuds voisins et de sélection progressive des meilleurs morceaux de chemins. Il y a en effet une juxtaposition progressive des arcs définissant en final le chemin complet. L'algorithme de routage que nous proposons s'inscrit dans cette même idée de juxtaposition des arcs qui sont ici des prestations. La juxtaposition implique la vérification que chaque prestation sélectionnée débute après la fin de celle qui la précède. Dans ce type d'algorithme, on peut intégrer facilement les contraintes logistiques recherchées telles que les dates d'arrivée, etc., ce qui permet de répondre à l'ensemble des exigences posées.

De plus, il faut alors introduire un système de « réservation » dans les différents moyens de transport afin de garantir l'acheminement des conteneurs tel que prévu, chaque « réservation » mettant alors automatiquement à jour les bases de données correspondantes.

Quelle que soit la modélisation du réseau choisie, le routage des conteneurs depuis la source n'empêche pas de pouvoir modifier l'acheminement si besoin en cours de route. Ce qui peut être le cas pour une meilleure consolidation des flux par exemple.

Nous avons ainsi réussi à définir un modèle de construction de base de données, ainsi qu'un algorithme de routage adapté à un Internet Physique avec un réseau « ad-hoc », mais avec un unique SA. Qu'en est-il dans le cas de plusieurs SA ?

4.2.3.2.2.2 Comment l'algorithme retenu devra s'adapter à une hiérarchisation de PI en plusieurs niveaux de SA ?

On rappelle que l'on a convenu que l'Internet Physique aurait une organisation hiérarchique formée de plusieurs systèmes autonomes. On rappelle aussi que pour faciliter le développement initial de notre modèle de routage, on a pris l'hypothèse d'un réseau formé d'un unique SA avec donc une connaissance complète du réseau au niveau de chaque nœud. Nous abordons ici une architecture hiérarchique de l'Internet Physique sous la forme de systèmes autonomes. Dans une telle architecture, un nœud n'aura plus une connaissance de l'état complet du réseau mais seulement celui du SA auquel il appartient. Il n'est donc plus possible, en se basant uniquement sur les données au niveau d'un nœud, de connaître le chemin complet depuis la source. Ce qui empêche aussi, par conséquent, de répondre aux exigences de la logistique tels que définis.

Répondre à de telles exigences nécessite en fait une communication entre les SA, afin de partager des informations sur l'état de leurs réseaux respectifs. Ce partage ne peut pas se faire d'une manière continue car des problèmes de tailles de bases de données et du transit d'informations s'imposent sans parler de confidentialité. On propose donc une vision locale et partielle que peut avoir chaque nœud en fonction de ses besoins.

En effet, on peut imaginer que pour chaque expédition d'un conteneur à une destination hors du SA du nœud source, ce dernier puisse demander et obtenir, via un système particulier, les données relatives à la destination du paquet et qui lui permettraient donc au final d'avoir une vision globale et exacte du chemin qui sera emprunté. On peut trouver plusieurs systèmes répondant à ce type de fonctionnement. On en propose ici un exemple.

L'Internet Physique pouvant comprendre plusieurs niveaux de systèmes autonomes et chaque niveau représentant lui-même un SA à part entière, nous allons considérer, à titre d'exemple, deux niveaux de SA, illustré par la Figure 43 (le SA de niveau 2 interconnecte des SA de niveaux 1).

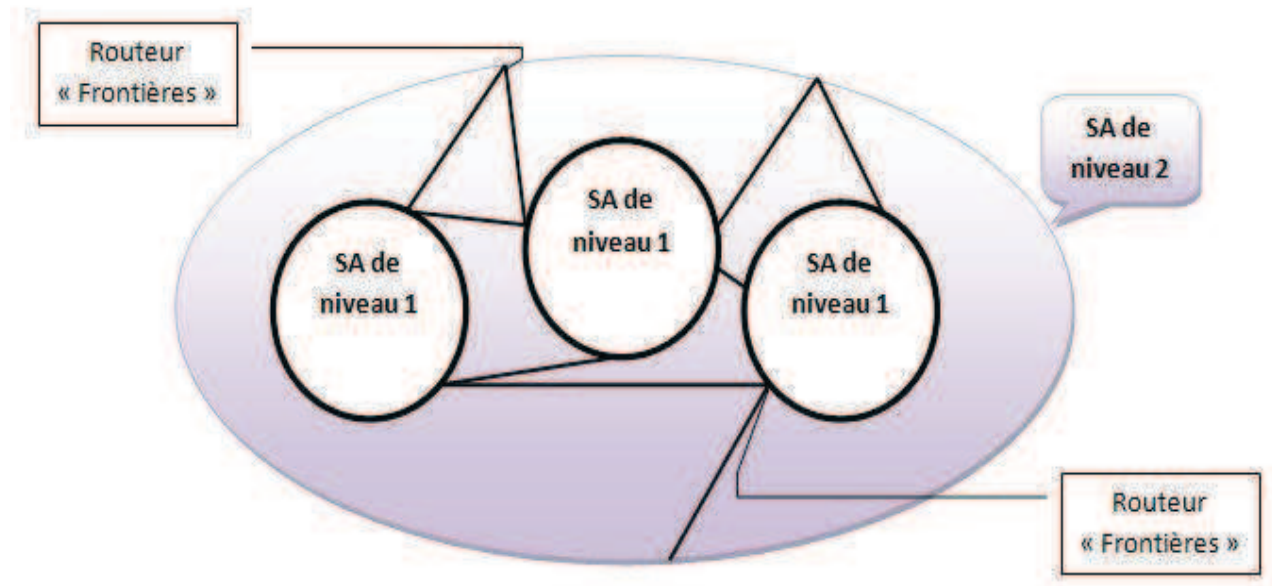


Figure 43: SA de niveau 2 interconnectant des SA de niveaux 1

On propose alors que chaque SA soit doté d'un portail de routage permettant de communiquer et d'échanger des informations avec d'autres portails de même nature. Les fonctions principales d'un tel portail de routage seraient :

- D'avoir une vision complète du réseau interne au SA
- D'avoir une vision du réseau externe au SA (les arcs entre les SA)
- De répondre aux nœuds internes au SA qui demanderont des informations concernant des destinations internes.
- D'interroger d'autres portails de routage externe pour demander des informations sur des destinations externes.
- Répondre aux requêtes des autres portails pour des destinations internes.

Considérons maintenant deux SA représentés par la Figure 44:

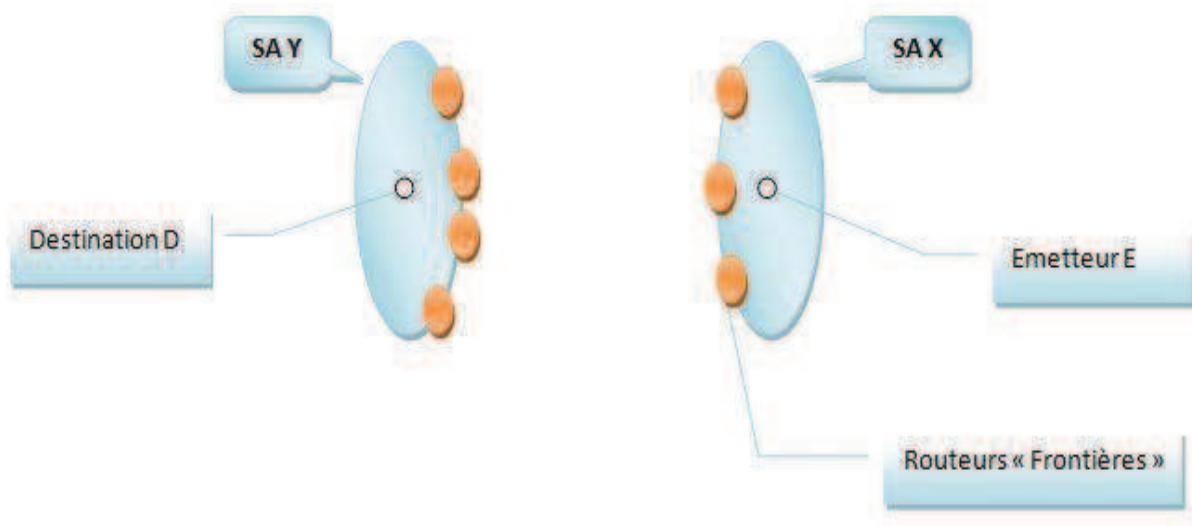


Figure 44: Communication entre deux SA - étape 1

Considérons qu'un nœud émetteur E appartenant à un SA X souhaite expédier des conteneurs à une destination D dans un SA Y. Le fonctionnement du système proposé serait ainsi :

- Le nœud E demande au portail associé au SA Y de lui fournir le meilleur chemin (selon les métriques de la demande, un chemin étant une liste de prestations) entre chaque nœud « frontière » du SA Y, et D.
- Le nœud E demande au portail associé au SA X, qui a connaissance des échanges entre SA, de trouver le meilleur chemin entre chaque « nœud frontière » de X et chaque « nœud frontière » de Y (le sens du chemin ayant bien évidemment un sens primordial).
- A ce stade, les informations brutes obtenues par E sont représentées dans la Figure 45 (où les arcs représentent les meilleurs chemins). Dans l'optique d'alléger la mémorisation de données, il convient de ne garder que les informations utiles et donc seul un meilleur chemin entre chaque nœud « frontière » du SA X et la destination D sera retenu (Figure 46).
- Le nœud E demande au portail associé au SA X, le meilleur chemin entre E et chaque nœud « frontière » du SA X. Il peut à ce stade calculer le meilleur chemin avec des métriques exactes depuis l'émetteur jusqu'à la destination. Il pourra aussi, en cas de besoin, connaître l'ensemble du chemin qui sera parcouru.

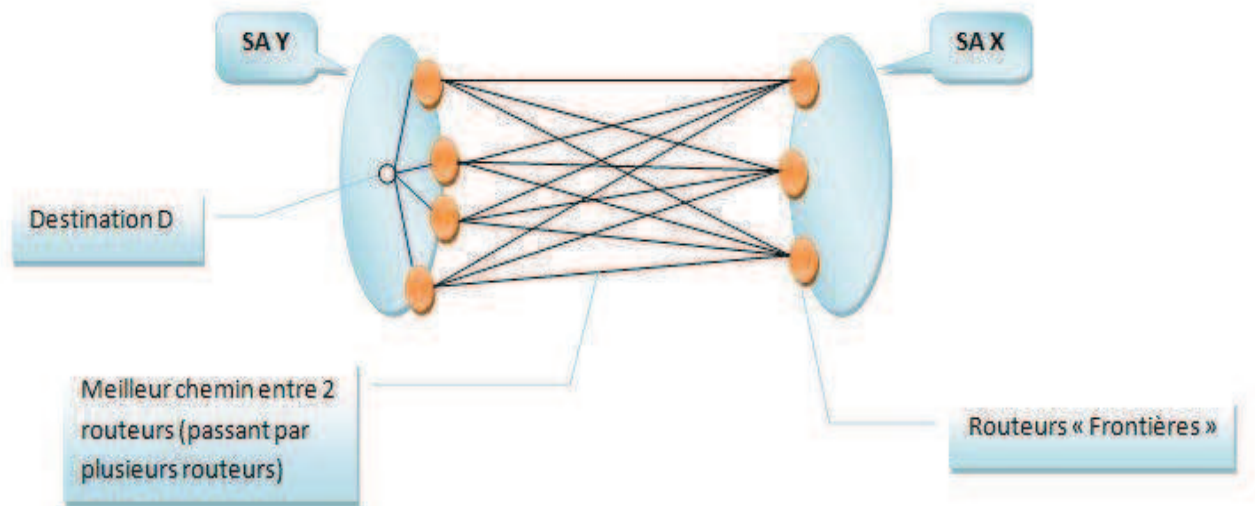


Figure 45: Communication entre deux SA - étape 2

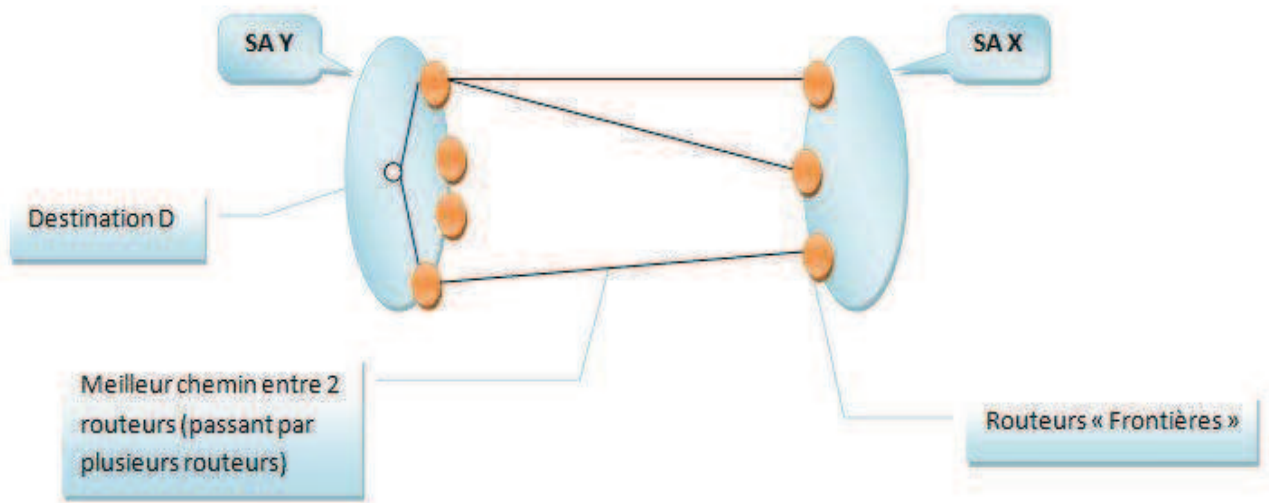


Figure 46: Communication entre deux SA - étape 3

On peut remarquer la complexité d'une telle opération. En effet, si on considère n le nombre de nœuds du SA X et p le nombre de nœuds « frontières » au SA Y, on aura $(n \cdot p + n + p)$ meilleurs chemins calculés, pour router un conteneur, répartis en:

- ✓ $n \cdot p$ meilleurs chemins calculés entre les différents nœuds « frontières » de X et ceux de Y
- ✓ p meilleurs chemins entre la destination D et chaque nœud « frontière » de Y
- ✓ n meilleurs chemins entre le départ E et chaque nœud « frontière » de X

Ce type de modèles nécessite des capacités de calcul considérables surtout si nous considérons des millions de conteneurs qui transiteront dans le réseau de l'Internet Physique. Des simplifications sont possibles au niveau du modèle de routage proposé, en limitant, par exemple, les choix de prestation entre certains nœuds, ce qui reviendrait à limiter les choix possibles lors de la recherche du plus court chemin. A titre d'exemple, on pourrait imposer aux algorithmes de considérer pour une certaine zone d'un SA une seule possibilité de sortie ou entrée en passant par un nœud « frontière » bien spécifique. Cette limitation doit se faire au cas par cas en étudiant les spécificités d'un réseau. Elle limiterait le nombre de calculs. Afin d'illustrer ce principe par un cas réel, on pourrait par exemple dire, si l'on considérait que la ville de Paris est gérée par unique SA, que toutes les expéditions partant de Paris à destination du continent américain doivent transiter par le nœud « frontière », l'aéroport Charles-De-Gaulle.

On peut aussi simplifier ce modèle en considérant des métriques standards à l'extérieur du SA de source. Cette idée vient du routage dans Internet qui affecte une même métrique pour un ensemble de destinations appartenant un même SA. Ainsi, pour un SA X donné, on aurait par exemple un unique coût pour atteindre n'importe quel nœud d'un SA Y. Ceci se fait aisément sur Internet car il y a un système d'adressage qui permet d'attribuer aisément chaque adresse IP à son SA. Avec une telle simplification, on ne peut plus connaître l'ensemble du chemin jusqu'à destination finale, sauf si source et destination sont dans le même SA. Cette solution revient à dire que l'on opte pour un réseau « permanent » pour la partie extérieure du SA, avec donc des coûts standards. Il s'agirait alors d'une optimisation partielle.

Il est important de souligner que les rayons des SA n'ont pas encore été définis. Leur définition dépend non seulement des acteurs logistiques (prestataires/opérateurs) présents mais aussi de la capacité des nœuds à gérer les flux physiques et d'informations. En effet, plus un SA sera grand, plus ses routeurs frontières auront besoin de la capacité nécessaire pour gérer l'ensemble des flux physiques et des flux d'informations lié à la détermination du chemin.

D'autre part, si nous intégrons le fait que le réseau Internet Physique serait structuré en plusieurs niveaux de systèmes autonomes, les portails que nous avons définis au niveau de chaque SA pourraient ne pas suffire en cas de grand nombre d'interactions entre SA du réseau. Dans ce cas, afin de limiter la tailles des données dans les portails associés aux SA, on propose d'avoir un portail de routage associé à chaque niveau de SA. Ce type de portail aurait

une connaissance sur les interactions entre les SA qui le composent, et permettrait la communication entre les portails de même nature. Ainsi, le portail de routage associé à un SA aura une connaissance limitée aux interactions entre les SA de son niveau hiérarchique. Pour toute autre information qui concerne d'autres niveaux dans la topologie du réseau PI, il faudra faire appel aux portails associés à ces niveaux.

Nous avons donc proposé dans ce paragraphe un modèle qui permet de répondre à un routage avec des métriques exactes et de connaître le chemin complet depuis la source. Il permet aussi d'intégrer plusieurs contraintes (ex. date limite), répondant ainsi à l'ensemble des besoins définis de la logistique.

Le modèle repose sur l'intégration de multiples portails de routage qui permettent de trouver avec exactitudes les meilleurs chemins entre n'importe quel couple de nœuds, via des échanges d'informations. Il faut faire attention à la fiabilité de tels systèmes pseudo centralisés, en prévoyant des solutions de secours en cas de panne au niveau d'un portail de routage. Plusieurs variantes peuvent être proposées, comme le fait de transférer la charge de calcul des nœuds vers les portails eux-mêmes ou centre de services informatiques avec garantie de service (serveurs multiples et multi localisés), etc. Ces variantes dépendront des capacités de mémoires et de calculs de chaque élément de l'Internet Physique. Des simplifications de ce modèles ont aussi été présentées, avec comme conséquence, la perte de précisions dans les résultats obtenus et/ou l'impossibilité d'identifier le chemin complet depuis la source. A l'inverse des réservations de bout en bout limiteraient les capacités d'optimisation « à la volée ».

4.2.3.2.2.3 Résumé de l'algorithme de routage retenu pour l'Internet Physique

Ainsi, le modèle que l'on propose pour l'Internet Physique aurait une architecture hiérarchisée sous formes de plusieurs systèmes autonomes. Son routage serait un routage de « source » permettant notamment de connaître le chemin complet depuis la source pour chaque conteneur. Ce routage n'empêche pas la possibilité de remettre en cause le chemin choisi en cours de route si une meilleure solution apparaissait ou que la demande le nécessitait.

Nous avons aussi montré l'intérêt d'un routage « adaptatif » dans le monde de la logistique qui subit de nombreux aléas tels que ceux du trafic ou des volumes. Concernant la modélisation du réseau des prestations logistiques (permanente ou « ad-hoc »), nous avons montré que les deux pouvaient se justifier et même se concurrencer. Par contre, nous choisissons pour une première implémentation de l'Internet Physique dans la simulation un

réseau considéré comme « permanent », pour ensuite migré, si nécessaire, vers un réseau « ad-hoc » en complément. Cette complémentarité reste cependant à étudier.

Dans un réseau considéré « permanent », les bases de données au niveau des nœuds seraient structurées sous la forme présentée dans le Tableau 13 et un algorithme classique de recherche de chemin sera implémenté. Par contre, pour le réseau « ad-hoc », et afin de prendre en considération l'aspect temporel, l'algorithme de routage qui sera utilisé devra vérifier à chaque pas la possibilité de juxtaposer des prestations prenant en compte plusieurs paramètres tel que le temps de parcours. Il s'apparente alors à un système de réservations avec des bases de données au niveau des nœuds telles que décrites par le Tableau 14.

Finalement, nous avons présenté des algorithmes de routage adaptés à un Internet Physique hiérarchisé sous formes de plusieurs SA, et évoluant dans un réseau considéré « permanent » ou « ad-hoc ». Ces algorithmes permettent de répondre à l'ensemble des besoins de la logistique actuelle et même au-delà en autorisant un véritable routage multi-critères sur mesure.

4.3 Conclusion

Nous avons présenté dans le chapitre précédent les concepts essentiels à l'interconnexion ; la conteneurisation, l'interconnexion des réseaux logistiques permettant les échanges de flux, et la topologie du réseau résultant structuré en plusieurs niveaux de systèmes autonomes (prestataire ou un sous-réseau d'un prestataire). Puis, dans cette même perspective, nous avons analysé dans ce chapitre les principaux algorithmes de routage dans Internet, ce qui nous a permis de proposer un type d'algorithme adapté aux besoins de la logistique. Il s'agit du routage à états de liens. Nous avons donc détaillé le fonctionnement d'un tel algorithme et montré la flexibilité qu'il offre.

Cette recherche ouvrent plusieurs pistes de réflexions, telle que la question de l'adressage. En effet, un système d'adressage intelligent permet de faciliter le routage en minimisant les données à mémoriser. C'est le cas de l'adressage postal où la lecture de l'adresse permet d'identifier le pays, puis la ville et enfin la rue de destination. De même, l'adresse PI d'un routeur devrait renvoyer au sous-réseau auquel il appartient.

L'ensemble de ces concepts innovants remettant en cause le modèle actuel de la logistique, proposent un modèle global ouvert dans lequel la consolidation et le partage des ressources devraient améliorer les performances. La question qui se pose donc naturellement est de savoir si ces nouveaux concepts amélioreraient réellement les performances logistiques, et si oui dans quelle mesure. Une première étude théorique a été réalisée pour mesurer l'impact d'une telle organisation, et a montré qu'une logistique se basant sur l'Internet Physique permettrait d'atteindre l'objectif d'une réduction de 75% des émissions de CO₂, tout en utilisant les mêmes moyens de transport d'aujourd'hui (les camions) (Ballot et al. 2011). Cependant cette étude reste très simplificatrice. C'est pourquoi nous avons choisi de pousser cette étude vers un modèle plus réaliste pour mesurer plus précisément les impacts d'une telle organisation, et ceci via une simulation.

La simulation est effectivement devenue incontournable pour la modélisation des systèmes logistiques complexes. (Thierry et al. 2008) fournissent à ce titre un aperçu détaillé de multiples modèles de simulation employés dans la gestion des chaînes logistiques. Nous voulions donc construire un modèle de simulation dans lequel seraient traduits les algorithmes développés pour l'Internet Physique, qui utilise des flux réels, et qui permette de mesurer des indices de performance. Ce modèle simulera différents scénarios pour l'Internet Physique mais aussi le système logistique actuel, étape nécessaire pour la comparaison et l'analyse des résultats obtenus.

Dans l'optique de simplifier notre modèle de simulation, nous avons choisi de considérer **un unique système autonome et le réseau comme « permanent »**. Nous considérons en effet qu'une première implémentation de l'Internet Physique se ferait dans le cadre d'un réseau supposé « permanent » vu les difficultés qu'impose un réseau « ad-hoc » (système d'informations élaboré, taille de base de données plus conséquente, algorithmes de routage plus complexe, etc.). De plus, nous ne nous préoccupons pas des modèles d'affaires et des relations entre prestataires à ce stade. En cherchant simplement à mesurer la potentialité de l'interconnexion des réseaux logistiques, nous considérons un seul prestataire pour l'ensemble des données que nous avons pour la simulation. Ces choix seront plus justifiés dans le prochain chapitre.

D'autre part, les principes et règles de fonctionnement que nous avons établi pour l'interconnexion des réseaux logistiques ne suffisent pas en tant que tel pour une simulation.

En effet, notre description s'est faite ici au niveau conceptuel et il est donc nécessaire de développer des protocoles plus opérationnels tels que les algorithmes de conteneurisation de la marchandise et du remplissage des moyens de transport. C'est ainsi que le prochain chapitre présentera un ensemble de protocoles accés sur le routage et le transport dans l'Internet Physique, ainsi que leurs implémentations dans le modèle de simulation.

Ensuite, un chapitre sera dédié aux résultats obtenus et à l'analyse du potentiel de l'Internet Physique.

Chapitre 5 : Propositions de protocoles pour transporter des conteneurs dans des réseaux de distribution interconnectés

5.1	Hypothèses pour la simulation	141
5.2	Conteneurisation des marchandises.....	143
5.2.1	Définition des conteneurs.....	143
5.2.2	La conteneurisation	146
5.2.3	Implémentation dans le simulateur	147
5.2.4	Améliorations possibles du protocole de conteneurisation	150
5.3	Acheminement des flux physiques	151
5.3.1	Objectifs de l'acheminement dans l'Internet Physique	151
5.3.2	Un algorithme de routage (d'acheminement) des conteneurs: le meilleur chemin	152
5.3.3	Implémentation dans le simulateur	154
5.3.4	Améliorations possibles du protocole de routage	155
5.4	Groupage des conteneurs et affectation aux moyens de transport.....	156
5.4.1	Protocoles de groupage et d'affectation aux moyens de transport	157
5.4.2	Le problème du Bin-Packing	159
5.4.3	Implémentation dans le simulateur	161
5.4.4	Améliorations possibles du protocole de groupage et d'affectation aux moyens de transport.....	164
5.5	Conclusion	166

Chapitre 5. Propositions de protocoles pour transporter des conteneurs dans des réseaux de distribution interconnectés

Dans le chapitre précédent, nous avons défini des concepts généraux qui régiraient le transport des conteneurs dans le réseau des réseaux, l'Internet Physique. Ces concepts, représentant des principes de fonctionnement, ne sont pas suffisants en tant que tels pour être implémentés dans un simulateur. En effet, un autre niveau de détail plus opérationnel doit être étudié.

Dans ce cadre, nous proposons ici des premiers protocoles dits « opérationnels » au sens de la simulation et nécessaires à son développement. Ils implémenteront les concepts généraux développés dans les chapitres 3 et 4. Il ne s'agit donc pas de protocoles finalisés qui seraient implémentés tels quels dans un Internet Physique, mais d'une solution de base permettant de simuler les gains potentiels de cette nouvelle organisation avec un nouveau niveau de précision.

Afin de simplifier l'implémentation d'un modèle de simulation pour PI, nous avons pris des hypothèses à savoir travailler uniquement sur un SA et considérer le réseau comme « permanent ». Ces hypothèses, qui feront l'objet du premier paragraphe, impliquent que nombreuses améliorations peuvent être envisagées pour améliorer les protocoles que l'on propose dans ce chapitre : considérer la réalité du réseau qui est « ad-hoc », une anticipation de trafic, une réservation de capacité sur des services cadencés, un coût variable en fonction du délai de prévenance, etc.

La première question qui se pose dans ce processus de routage dans l'Internet Physique est la problématique de la conteneurisation de la marchandise à expédier. Cette question sera traitée dans le second paragraphe.

Une fois la conteneurisation effectuée, il faudra définir la route qu'empruntera chaque PI-conteneur. Cette détermination de l'acheminement ou de la route fait l'objet du troisième paragraphe.

Enfin, il faudra transporter ces PI-conteneurs de manière à utiliser au mieux les moyens de transport à disposition, limitant ainsi les gaspillages économiques et environnementaux. Il s'agit de la problématique du groupage/regroupement des conteneurs et du chargement des moyens. Ce point est traité dans la quatrième partie.

Il est à noter que l'étape de l'acheminement et celle du groupage pour chargement sont en fait interdépendantes. Par exemple, s'il apparaît à un nœud que la route choisie n'a pas de départ dans un délai compatible ou que le moyen de transport prévu ne permet pas un chargement correct, le conteneur peut être reporté sur un autre chemin, c'est-à-dire vers une autre prestation logistique.

Un schéma général de ce protocole qui résume les décisions prises lors d'une expédition dans le cas de PI est donné par la Figure 47.

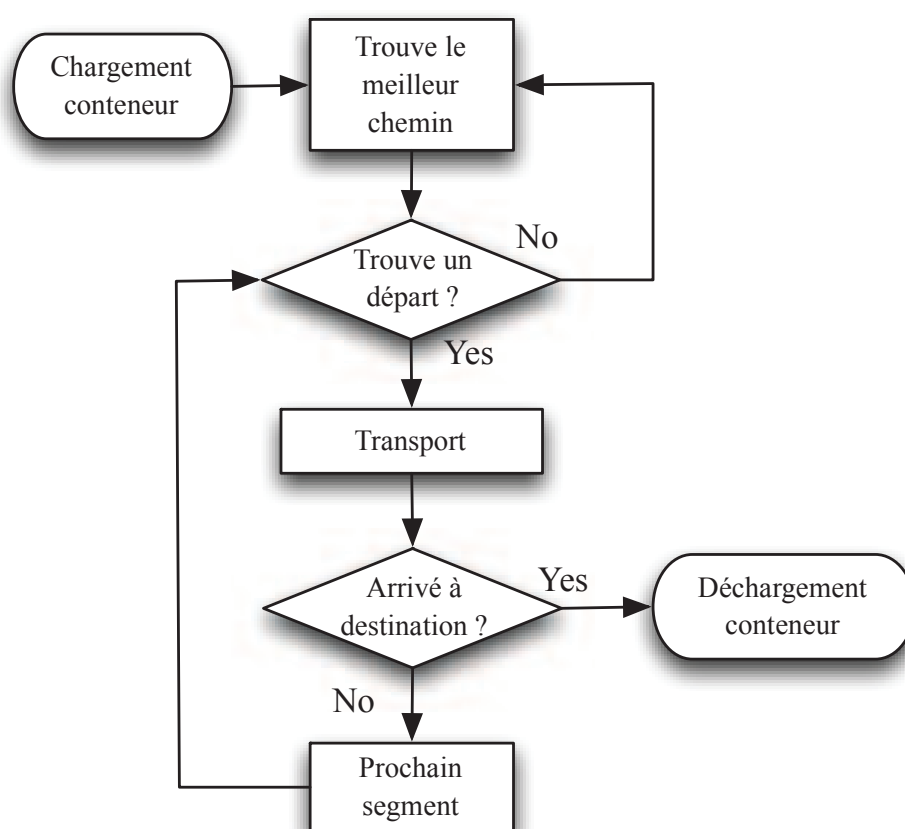


Figure 47: Schéma de principe des protocoles routage dans le cadre d'une expédition

Les détails algorithmiques concernant l'implémentation de ces trois protocoles, conteneurisation, acheminement et groupage/chargement dans notre modèle de simulation seront également présentés dans chacune des parties correspondantes.

Ces protocoles sont implémentés dans trois types d'agents dans le modèle de simulation, qui sont respectivement : l'agent Traitement de commande et de Conteneurisation, l'agent d'Acheminement et l'agent Transport.

Il est à noter que le modèle de simulation, prend comme entrée du système une base de données (Input) qui regroupe les principales commandes de deux grands distributeurs français, et un réseau d'infrastructures routières et ferroviaires qui représente notamment le réseau PI. On reviendra plus en détail sur l'architecture générale du simulateur et le contenu de ces bases de données.

Pour l'instant on indique que ces bases contiennent les informations suivantes:

- Des nœuds (entrepôts, magasins, DC et usines et hub)
- Un réseau routier et ferroviaire support des prestations logistiques
- Des commandes qui sont composées de lignes de commandes : chaque ligne de commande est définie par un Id Ligne (Ligne de commande), Id Commande, Id Produit, une quantité par SKU (produit dont le poids et le volume sont donnés par carton), une quantité en nombre de palettes équivalent, la source, la destination, et la date d'envoi.

5.1 Hypothèses pour la simulation

Le modèle de simulation utilisé ici est basé sur un système multi-agents. Il repose sur la mise en œuvre de modèles de comportements théoriques, dans le cadre de l'Internet Physique.

A ce titre, nous considérons ici des hypothèses simplificatrices pour la modélisation.

Nous avons proposé, par transposition des concepts de l'internet digital, que l'Internet Physique ait une structure hiérarchisée sous formes de plusieurs niveaux de systèmes autonomes, que le routage soit « adaptatif » lui permettant de s'adapter aux évolutions des réseaux, et qu'il soit « de source » calculant ainsi la totalité du chemin des conteneurs au nœud de départ, sans que ceci ne soit une raison pour ne pas le remettre en cause lors de l'acheminement.

L'ensemble de ces considérations qui relève des caractéristiques du routage dans le réseau Internet, ne suffit pas à définir correctement les typologies du routage des conteneurs dans le réseau PI. En effet, une différence majeure entre ces deux réseaux est la notion des prestations de transports qui ne se pose pas pour les réseaux informatiques. C'est ainsi que nous avons introduit une nouvelle dimension qui concerne les modélisations possibles du réseau de prestations de transports. En effet, nous avons distingué un réseau « permanent », dans lequel

on ne parle plus de prestations de transports mais de schéma logistiques avec des métriques standardisées et un réseau « ad-hoc » plus réaliste.

Nous avons développé des algorithmes de routage pour ces deux types de réseau et nous avons constaté la complexité du routage dans un réseau « ad-hoc ». De plus, le fonctionnement de cet algorithme nécessite de connaître l'ensemble des états des prestations de transport en temps réel ainsi que leurs prévisions de parcours (en termes d'horaires, de disponibilités, de prix, etc.). Ces données étant très difficiles à obtenir, et considérant qu'une première implémentation de l'Internet Physique pourrait se faire dans le cadre d'un réseau « permanent », nous avons décidé de retenir cette hypothèse pour l'évaluation de la potentialité de l'Internet Physique. Il est à noter qu'une telle hypothèse ne peut qu'atténuer les résultats attendus car nous sous-optimisons l'utilisation des moyens vu que l'on ne considère pas la dynamique réelle des besoins. On note cependant que ce fonctionnement est cohérent avec les schémas logistiques des grandes entreprises de produits de grande consommation qui utilisent des prestations récurrentes avec une flexibilité en volume.

De plus, toujours dans le cadre de la simulation des performances de l'Internet Physique, nous avons aussi choisi de considérer un unique système autonome. En effet, notre simulation porte sur des données réelles concernant des commandes entre des usines, des entrepôts et des centres de distributions, pour deux grands distributeurs français, et nous considérons que ces réseaux constitués par différents acteurs logistiques peuvent être vu comme un unique système autonome géré par un seul prestataire. Ne pas prendre cette hypothèse reviendrait à travailler sur plusieurs prestataires, et nécessiterait donc de différencier des politiques d'échange de flux internes et externes et considérer les modèles d'affaires de chacun et les accords de partage de trafic. Ce qui n'est l'objet de cette première étude.

C'est ainsi, que dans un cadre de simplification de notre modèle de simulation, nous considérons un unique système autonome et un réseau « permanent » de prestations. De plus compte tenu des volumes traités à chacun des points (usine, entrepôt et centre de distribution) nous ne considérons ici que des prestations de transport en trace directe. Les tournées, plus adaptées à de faibles volumes, sont ici non traitées.

Enfin, les hubs sont considérés ici comme un ensemble de files d'attente avant le départ avec la prestation sélectionnée et avec des délais constants de traitement pour le déchargement d'un moyen, de tri des conteneurs et de rechargement. Cette hypothèse revient à considérer une capacité infinie des opérations de traitement sur hub. Cette hypothèse pourrait facilement être

levée en ajoutant des fonctions de durée de traitement de la charge en lien avec une conception et un dimensionnement de hub.

Cependant au-delà de ces hypothèses « sélectives », il convient de noter qu’aucune exigence de synchronisation des expéditions n’est posée aux flux actuels. Chaque expédition de chaque acteur est traitée de manière indépendante lors de sa conteneurisation et du choix d’acheminement. On peut donc considérer que les expéditions sont réalisées de manière asynchrone par l’ensemble des acteurs.

5.2 Conteneurisation des marchandises

Pour simuler le fonctionnement de l’Internet Physique, il faut conditionner les commandes en conteneurs qui encapsuleront les marchandises correspondantes durant tout leur cheminement. A la différence d’Internet où le paquet de données est de taille unique et standardisé, la logistique nécessite différentes tailles de conteneurs car les produits peuvent être de tailles très variées. La question qui se pose est donc de définir le protocole d’encapsulation, qui comprend la définition des différents jeux de conteneurs que l’on utilisera et la façon avec laquelle la marchandise y sera affectée.

5.2.1 Définition des conteneurs

La définition d'un ensemble de conteneurs pour l'Internet physique avec différentes tailles et répondant à différents cahiers des charges est une tâche ardue qui n’est pas encore finalisée. La problématique générale de l’adéquation des tailles des conteneurs aux tailles des produits et à leur conditionnement est un sujet très vaste qui dépasse le cadre de ce mémoire. Les travaux menés aux Etats-Unis par l’équipe de Russell D. Meller (Meller et al. 2012) montrent que, par rapport à la manière actuelle de conditionner les produits et ensuite d’empiler ces conditionnements sur une palette, un gain global de l’ordre de 10% est possible en volume en passant à un ensemble de conteneurs. En effet dans un premier temps si le passage par un nombre limité de conteneurs modulaires peut réduire leur remplissage individuel, l’agencement de ces conteneurs permet un gain net car il n’y aurait plus de vide.

La conteneurisation peut s'entendre à différents niveaux d'échelle. L'échelle du conteneur maritime ou de la semi-remorque, celle de la palette, ou celle du colis. Chaque échelle correspondant respectivement à un ordre de grandeur particulier : de la dizaine de m^3 (30 à $90m^3$), puis (1 à $2 m^3$) et enfin au centième de m^3 ($0,4 \times 0,4 \times 0,2 = 0,032m^3$). Dans le cadre de ce modèle où l'on se focalise sur le transport et où la préparation des commandes n'est pas changée, seule la première échelle de taille de conteneur est abordée.

Dans notre simulation, nous avons choisi des dimensions pour les PI-conteneurs, que nous considérons ensuite comme hypothèse. Ces choix ne sont pas aléatoires mais découlent d'un raisonnement d'exploration se basant sur des constats réels.

En effet, nous avons vu dans le chapitre 3, lors de l'étude de l'hétérogénéité des unités de chargements, que le chargement des conteneurs maritimes par des palettes standards européennes se traduisait par des pertes systématiques d'espaces. C'est d'ailleurs ainsi que sont apparues les caisses mobiles dont les dimensions utiles intérieures permettent un chargement optimal en palettes européennes. L'inconvénient majeur de ces caisses mobiles est qu'elles ne peuvent utiliser le réseau maritime car non empilables. Ainsi, il n'est pas possible d'avoir des unités de chargements, et par conséquent des PI-conteneurs, adaptés à la fois aux dimensions des palettes et à celles des conteneurs maritimes ISO. Notre terrain d'étude, le secteur de la grande distribution, a la spécificité de ne pas (ou très peu) utiliser le transport maritime pour les produits alimentaires. C'est d'ailleurs le cas de nos flux, dont les points sources et destinations sont majoritairement en France, ou à défaut dans un pays limitrophe. A ce titre, les données de la simulation portent sur des commandes réelles qui ont été transportées quasi exclusivement par la route. Ainsi, pour le choix de nos PI-conteneurs, nous nous concentrons uniquement sur une nécessité d'harmonisation avec les dimensions des palettes et des camions. Renvoyant ainsi à des études ultérieures l'ajustement entre les conteneurs de taille proche d'une palette et ceux de la taille d'un conteneur maritime ou d'un wagon.

On note toutefois, qu'il existe une unité de transport intra-européenne parfaitement intermodale, à savoir les conteneurs « Pallet Wide » (PW). Ces conteneurs, à l'instar du conteneur ISO, sont totalement adaptés aux palettes européennes et sont gerbables utilisant ainsi la pleine capacité des navires, à l'inverse des caisses mobiles (Bouley 2010).

Ainsi, nous avons choisi dans notre cas les Pallet Wide 40' comme référence de conteneurs et dont les dimensions sont données dans le Tableau 15. Nous nous intéresserons donc dans un premier temps à des conteneurs dont la section est équivalente à celle ce type de conteneurs,

soit 2,4 x 2,4m (dimensions intérieures). Tous les produits actuellement palettisés sont donc susceptibles d'y rentrer sans perte d'espace. A ce titre nous considérerons que leur volume intérieur peut être intégralement utilisé et ne nous ne prenons pas en compte de coefficient de foisonnement supplémentaire. Dans un premier temps, nous utilisons la longueur utile d'un Pallet Wide 40' (12m) et la diviserons par 10 pour avoir le PI-conteneur de plus petite longueur.

Le Tableau 15 donne une comparaison entre les PI-conteneurs et d'autres conteneurs que l'on retrouve sur le marché.

Tableau 15: Comparaison de conteneurs pour une longueur standard de 20pieds (dimensions intérieures)

Nom	Standard ISO	Test PI	Pallet Wide 40'	High cube 9'5''
Lxh (m)	2,33x2,38	2,4x2,4	2,4x2,4	2,33x2,89
Volume utile (m ³)	32,75	34,56	33,69 ¹⁰	39,85

Il ne s'agit pas ici de sections optimisées mais d'un ordre de grandeur compatible avec les données du marché. A partir de cette section plusieurs tailles de conteneurs peuvent être proposées. Pour notre modèle de simulation, nous avons utilisé plusieurs jeux de tailles de conteneurs et en particulier un jeu de progressions de 6 tailles de conteneurs:

2.4m*2.4m*{1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6,12} m.

La section commune les rend compatibles avec les Pallet Wide et les moyens de transport tels que les navires, les trains et les camions remorques. Des conteneurs avec de plus petites tailles n'ont pas été testés ici vu que les destinations sont des centres de distribution, mais il serait possible de les tester dans l'avenir. Un ensemble avec des conteneurs de la taille de la semi-remorque européenne a été également testé.

Ainsi, pour le modèle de simulation, nous définissons les tailles des conteneurs comme hypothèse et nous mesurons les niveaux de performance: taux de remplissage, l'utilisation des moyens de transport et l'intensité de manutention. En retour, le modèle de simulation contribue au processus d'évaluation pour la spécification des dimensions des PI-conteneurs.

¹⁰Bouley, C. (2010). Manifeste pour le 45' PALLETWIDE : Un conteneur vert pour l'Europe. Geodis Global Solutions.

5.2.2 La conteneurisation

Pour déterminer les conteneurs à utiliser pour chaque expédition (une origine, une destination finale, une date d'expédition) le critère retenu est celui du minimum de conteneurs qui maximise les taux de remplissage. Ce critère a été retenu pour minimiser les efforts de manutention nécessaires et donc en limiter le coût. Par exemple, si une expédition occupe l'équivalent de 45% d'un conteneur de 12m de longueur et que des conteneurs de 12m, 6m et 3m de longueur sont disponibles, alors la solution sera un conteneur de 6m de longueur et non un de 12m ou deux de 3m. Le problème de leur remplissage est un problème dit de sac à dos. Cependant, on n'a ici que des conteneurs qui ont une empreinte donnée en équivalent palette et une capacité qui s'exprime en multiple de cette empreinte. Par exemple un conteneur de 1,2 m contient l'équivalent de 3 euro-palettes. Le problème de remplissage peut donc être simplifié et ramené à un simple problème de respect de la capacité de chaque conteneur. On suppose au stade de la conteneurisation que ceux-ci sont toujours disponibles en toutes tailles. L'ensemble des conteneurs ainsi définis sont ensuite chargés sur les moyens de transport dans le respect des contraintes de volume et de poids.

L'ensemble des tailles de conteneurs que l'on met à disposition de l'Internet Physique peut également être ajusté suivant plusieurs stratégies possibles. La première consiste à utiliser le nombre minimum de conteneurs afin de réduire le coût de la manutention et de la conteneurisation, poussant ainsi l'utilisation des conteneurs les plus grands. Une seconde est l'utilisation de conteneur de plus petite taille pour profiter du système PI et réduire les niveaux de stock. En conséquence seule la plus petite taille du conteneur est prise en compte dans le modèle. C'est pourquoi nous avons choisi ces deux jeux de conteneurs « extrêmes » dans le Tableau 16 sans exclusion d'autres possibilités, qui seront testées dans des scénarios différents de PI. C'est d'ailleurs dans une perspective d'une première analyse de l'impact de la taille des conteneurs, que nous avons choisi de tester des conteneurs de longueurs de 3 ou 6 m. Ces dimensions correspondent à celles utilisées dans le cadre du projet « CaRL®-Seagate », qui examine les possibilités d'un meilleur transfert de flux entre les ports maritimes et le réseau terrestre allemand, pour un transport multimodal plus flexible (CaRL 2012).

Tableau 16: Jeux de conteneurs

Jeux	Dimensions (<i>intérieures utiles</i>)
1	2.4m*2.4m*12m
2	2.4m*2.4m*1.2m
3	2.4m*2.4m*{1.2,2.4,3.6,4.8,6,12}
4	2.4m*2.4m*{3,6}

5.2.3 Implémentation dans le simulateur

Ce protocole est implémenté dans l'agent Traitement des commandes et Conteneurisation. On verra dans le prochain chapitre que ce même agent peut aussi avoir d'autres fonctions que celles de la conteneurisation. Pour l'instant on ne considère que cet aspect de création et remplissage de conteneurs.

Le modèle lit ainsi les commandes dont la date d'expédition prévue est à échéance. Lors de cette lecture, on crée des expéditions en regroupant l'ensemble des lignes de commandes (chaque ligne de commande correspondant à un produit) qui ont la même destination pour la même date d'expédition prévue. Puis pour chacune de ces expéditions vient l'étape de la conteneurisation.

En effet, vu que les conteneurs sont modulaires, nous avons choisi d'utiliser comme unité de mesure du volume, un parallélépipède de dimensions : 0.4m*0.6m*0.8m, soit 1/12 de palette complète. Cette unité de mesure que l'on nomme *Unit_Container*, permet d'exprimer plus facilement l'ensemble des volumes des expéditions, des capacités des camions et des conteneurs. Sachant que ce parallélépipède est modulaire vis-à-vis des différents conteneurs et moyens de transport.

C'est ainsi que les expéditions ont un poids (en kg) et un volume exprimé en nombre de *Unit_Container* (obtenu par un simple rapport de volume entre la taille de la commande en m³ et celle du *Unit_Container* en m³ également).

La conteneurisation des expéditions passe par deux étapes. La première est une vérification des poids des expéditions pour faire en sorte qu'elles ne dépassent pas la capacité des semi-remorques en poids (25 tonnes) qui devient la capacité des conteneurs. Ainsi, en cas de

dépassement, les expéditions seront découpées en lots de manière à respecter les contraintes. Ce processus a pour but de faciliter la deuxième étape qui insérera ces nouvelles expéditions obtenues dans des conteneurs.

Ce découpage se fait via le protocole suivant appliqué pour chaque expédition:

- Créer un nouveau lot de marchandises à expédier (lot d'expédition). A ce stade ce lot est une liste vide.
- Pour chaque ligne de commande de cette « expédition », la déplacer vers le lot tant que le poids limite (25 tonnes) est respecté.
- Si la ligne de commande ne peut pas être insérée dans le lot pour manque de poids disponible, on divise cette ligne de commande en une première ayant comme quantité la capacité restante en poids, et une seconde pour laquelle on créera un nouveau lot. On y déplace aussi le reste des lignes de commande de l'« expédition » en traitement.

Le raisonnement se fait ainsi en boucle jusqu'à ce que l'ensemble des expéditions soit traité, et le résultat sera une liste de lots d'expéditions ne dépassant pas les limites en poids.

Ensuite, la deuxième étape du processus de la conteneurisation s'occupe de la contrainte du volume. C'est dans ce cadre que chaque lot d'expédition ainsi créée est inséré dans des conteneurs. On cherche pour cela parmi les conteneurs possibles, le plus petit qui puisse contenir ce lot d'expédition (en termes de volume). Le lot est donc inséré dans le conteneur le plus petit qui la contient intégralement.

Si le lot est trop grand pour pouvoir être inséré dans un conteneur (parmi ceux définis), il sera divisé en plusieurs autres ne dépassant pas la capacité du plus grand conteneur défini. Cette nouvelle division se fait via le protocole suivant appliqué pour chacun des lots d'expédition concernés :

- Créer un nouveau conteneur (le plus grand en taille)
- Pour chaque ligne de commande de ce lot d'expédition, l'insérer dans le conteneur tant que possible
- Si la ligne de commande ne peut pas être insérée dans le conteneur pour manque d'espace, on divise cette ligne de commande en une première ayant comme quantité la capacité restante du conteneur (en volume), et une seconde qui sera affectée au reste du lot d'expédition pour laquelle la même procédure sera appliquée (à savoir de trouver le plus petit conteneur qui puisse la conteneuriser).

Le raisonnement se fait ainsi en boucle jusqu'à ce que l'ensemble des lots d'expéditions soit traité. C'est ainsi que nous aboutirons à un ensemble de conteneurs avec différentes tailles qui « encapsuleront » de la marchandise.

Par principe, ces protocoles cherchent à minimiser le nombre de conteneurs dans le respect des commandes passées. Cette propriété limitera ainsi les coûts de manutention.

La Figure 48 présente un aperçu de ces étapes sous notre modèle de simulation.

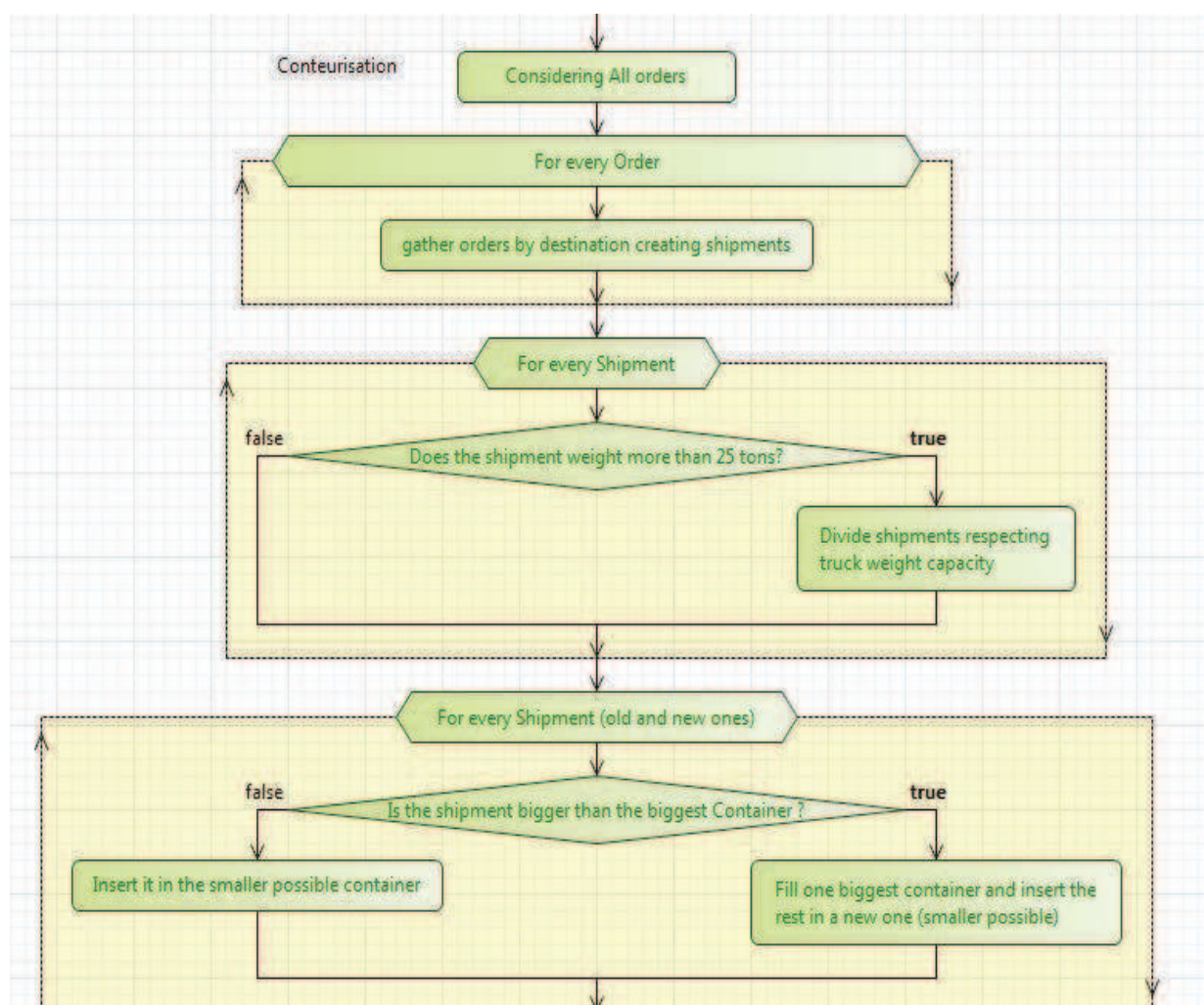


Figure 48: Aperçu du processus de création des conteneurs implémenté dans le simulateur

Les marchandises ainsi conteneurisées, il reste maintenant à exposer les protocoles qui régiront l'acheminement des différents conteneurs, et ceux de leurs groupages.

5.2.4 Améliorations possibles du protocole de conteneurisation

Différents niveaux d'amélioration sont possibles concernant la conteneurisation. Cependant par soucis de simplification, nous avons choisi de faire abstraction d'un certain nombre d'éléments afin de pouvoir implémenter nos protocoles dans un modèle et rendre possible sa simulation, au vue de la taille des données-entrée (input) du système.

Un premier niveau d'amélioration consiste à prendre en compte plusieurs niveaux de conteneurs (à différentes échelles), ce qui augmenterait la flexibilité du système, donc les taux de remplissage. Dans le même esprit, il serait intéressant de savoir si une augmentation du choix de taille des conteneurs offrant ainsi plus de choix, et donc plus de flexibilité, serait une bonne idée. En effet, on pourrait étudier l'impact d'une telle diversité des conteneurs dans la performance globale de l'Internet Physique, car il est fort probable qu'un nombre restreint de conteneurs complémentaires au vue de la taille des chargements des moyens de transport, soit une meilleure solution qu'un grand choix de conteneurs.

Un autre niveau d'amélioration dans le protocole de conteneurisation que l'on a choisi est envisageable si on remet en cause notre critère retenu pour le choix du conteneur. En effet, nous avons choisi de prendre comme conteneur celui qui maximise les taux de remplissage. On pourrait imaginer un système qui permette de prévoir à l'avance le parcours de certaines marchandises pour pourvoir, par exemple, prendre des conteneurs plus grands que la marchandise initialement insérée dans l'attente de poursuivre le remplissage avec d'autres sous conteneurs au cours du cheminement dans le réseau PI.

Finalement, la grande distribution comporte des produits divers et variés avec des contraintes de transports et de conservations différentes comme les produits frais par oppositions à ceux de l'épicerie. Ainsi, considérer cette diversité de la marchandise, serait intéressant dans la définition de l'assortiment des conteneurs. On aurait par exemple des conteneurs réfrigérés, comme on trouve aujourd'hui des camions réfrigérés.

Il s'agit ici uniquement de quelques pistes d'améliorations. Il y en a forcément d'autres mais rappelons que l'objectif de ces protocoles est davantage de mesurer le potentiel et la robustesse de PI que de proposer les protocoles finaux à mettre en place réellement.

5.3 Acheminement des flux physiques

L'acheminement des paquets de données dans le réseau Internet, en tant que détermination de la route, est appelé routage. Ici le routage ne se limite pas uniquement à trouver le chemin mais comprend aussi la conteneurisation et le groupage avec sa fonction de transport, nous parlons donc ici d'acheminement pour signifier la détermination de la route en logistique.

Ainsi, le routage est une méthode bien connue utilisée dans plusieurs domaines tels que les réseaux informatiques et les transports. En matière de logistique, les applications de routage sont centrées sur des véhicules ou des flottes afin de trouver le plus court chemin ou résoudre les problèmes de tournées. Cependant les techniques de routage peuvent également être appliquées d'une manière très différente aux routages des conteneurs depuis leur origine vers leur destination.

Dans l'Internet Digital, un protocole de routage spécifie comment les nœuds de réseau communiquent pour connaître l'état du réseau et utilisent cette connaissance pour sélectionner une route entre deux nœuds du réseau. La sélection de la route est faite sur la base d'un algorithme de routage par une fonction de « coût » ou de « distance » (Comer 2006). Nous nous inspirons de ces méthodologies pour définir le protocole de routage des marchandises conteneurisées dans Internet physique. Ici le protocole a pour mission de trouver la meilleure combinaison de schémas logistiques entre les nœuds du réseau, pour qu'un conteneur atteigne sa destination en fonction de sa priorité (délai minimal, coût minimal, etc.).

Dans cette partie, nous introduirons les objectifs attendus du routage des flux physiques pour finalement proposer les protocoles qui seront implémentés dans le modèle de simulation. On donnera ensuite des pistes d'amélioration.

5.3.1 Objectifs de l'acheminement dans l'Internet Physique

Pour Internet Physique ainsi que pour Internet, le routage vise à minimiser une fonction-objectif. Contrairement aux paquets de données avec presque aucun coût variable de transport, le fret génère un important coût variable dû à son transport. Par conséquent, la mobilisation des moyens se fera toujours dans un compromis avec d'autres objectifs, comme celui du temps d'attente. Les objectifs du routage des PI-conteneurs peuvent être regroupés selon les trois principaux critères des transports:

- Le coût : c'est un des critères les plus importants. Il comprend non seulement le coût de transport, mais aussi ceux de la manutention, du tri et du transit à travers les nœuds. Le protocole de routage pourra chercher à le minimiser.
- Le temps est également un objectif important : Il s'agit du délai complet pour atteindre la destination. Le temps est comptabilisé sur tous les segments du réseau, ce qui inclut les temps de transport, de manutention mais aussi d'attente avant le départ pour un hub par exemple.
- L'impact sur l'environnement, mesuré ici par les émissions en CO₂. Il s'agit d'un critère émergent mais amené à se développer dans le futur. Ce critère est d'autant plus important que les moyens de transport sont de performances très différentes à ce titre. Nous considérons dans notre recherche uniquement les émissions du transport car de premier ordre sur les produits secs ou liquides.

Comme nous pouvons le voir, les objectifs du routage peuvent être assez complexes et être mixés en fonction des priorités fixées par l'expéditeur, par exemple le moins cher en moins de trois jours ou le plus rapide mais livré entre 8h et 10h du matin, etc. De plus à la différence d'Internet, l'objectif peut être assigné spécifiquement à chaque PI-conteneur par son expéditeur. Cela signifie qu'un PI-conteneur aura pour objectif de minimiser le coût alors que son voisin aura pour objectif de minimiser les émissions ou le délai. Il y aurait donc mixité de flux dans les hubs et donc priorisation au chargement des moyens de transport.

5.3.2 Un algorithme de routage (d'acheminement) des conteneurs: le meilleur chemin

Une des premières étapes de l'algorithme de routage est la détermination du meilleur « chemin » pour atteindre la destination finale. Cet algorithme, dont les critères ont été définis lors du précédent chapitre, est utilisé systématiquement après le remplissage d'un conteneur pour déterminer un premier « chemin » qui pourra aussi être remis en cause si nécessaire durant le cheminement du PI-conteneur si le trajet défini n'est plus compatible avec les objectifs assignés.

La proposition de routage faite ici suppose la disponibilité de l'information au niveau des nœuds de l'Internet Physique et de l'expédition asynchrone de chaque PI-conteneur. L'algorithme est exécuté d'une manière décentralisée, sans aucune exigence de coordination

par les autres opérateurs potentiels. L'algorithme est basé sur le meilleur chemin à partir de la position actuelle vers la destination en fonction des métriques à minimiser. L'objectif est de sélectionner le meilleur chemin parmi un ensemble de schémas logistiques interconnectés, par exemple pour atteindre un centre de distribution régional à partir d'une usine.

Vu que l'on a considéré un réseau « permanent », le routage se fera donc dans un réseau de schémas logistiques, composé d'un ensemble de routes et de voies ferrées connectés aux PI-nœuds. Ce réseau, que l'on appellera réseau Internet Physique (PI), a été obtenu via une procédure d'optimisation que l'on détaillera lors du prochain chapitre. On retient donc que le protocole du routage sera appliqué sur le réseau PI qui se comporte comme s'il existait un réseau câblé avec des délais d'accès à chaque liaison. Trouver le meilleur chemin revient alors à sélectionner, dans ce réseau PI maillé de schémas logistiques possibles, la meilleure combinaison pour satisfaire l'objectif assigné au PI-conteneur (plus rapide, etc.).

Ce problème est en fait un problème classique de plus « court » chemin dans un graphe où les arcs sont les schémas logistiques. La notion de « court » est relative au poids assigné à chaque schéma logistique: coût, temps, émissions, ou toute combinaison de ceux-ci. Il existe de nombreux algorithmes permettant de trouver ce meilleur chemin. Dans notre application, nous ne sommes pas à la recherche d'une approche de programmation mais plutôt statique vu que nous considérons que le réseau PI convergera rapidement en cas de changements imprévisibles dans le réseau. Pour ce faire, deux types d'algorithmes sont possibles: des algorithmes exacts pour fournir la solution optimale tels que l'algorithme de Kruskal, Prim, Bellman-Ford-Moore ou Dijkstra (Bellman 1958, Dijkstra 1959, O'Cearbhaill et al. 2005), et les heuristiques qui peuvent accélérer le processus d'optimisation en sacrifiant éventuellement de la précision dans les résultats obtenus (Fu et al. 2006).

Dans le cadre du problème du plus court chemin, trouver la solution optimale dans un graphe de grande taille est complexe, nécessitant un temps de calcul élevé. C'est exactement notre cas avec un réseau de plus de 14.000 arcs (routes et rails) et 500 nœuds et, dans certains scénarios, plus d'un million de conteneurs à acheminer à travers ce réseau. Nous utilisons donc une heuristique pour trouver des solutions rapides en cherchant tout de même des solutions optimales ou du moins proches de l'optimum. Après un examen des heuristiques liées au problème, nous avons constaté que A*, qui est le plus populaire parmi tous les algorithmes heuristiques de ce type de problème (Fu et al. 2006), est le plus apte à être appliqué dans notre modèle, car il nous permet d'avoir des chemins optimaux.

L'algorithme A* est un prolongement de l'algorithme exact de Dijkstra et utilise une fonction d'évaluation sur chaque nœud pour estimer le meilleur chemin entre ce nœud et celui de destination permettant ainsi d'«orienter» l'algorithme de Dijkstra. Cette fonction d'estimation, qui mesure une sorte de « distance restante » doit être bien définie, car c'est elle qui permet d'atteindre ou pas la solution optimale. Dans notre cas, nous avons veillé à assigner des valeurs minimales pour cette fonction, garantissant des solutions quasi optimales. Par exemple pour le critère temps, nous avons choisi de mettre la distance euclidienne multipliée par la vitesse du moyen de transport le plus rapide comme fonction d'estimation. Il est à noter qu'avec une fonction d'estimation de valeur nulle, nous avons toujours la solution optimale, ce qui a pu être fait dans certains scénarios. Les lecteurs pourront se référer à (Dechter et al. 1985, Fu et al. 2006) pour plus de détails.

Avec cet algorithme, nous sommes en mesure de trouver à chaque nœud le meilleur chemin vers une destination répondant ainsi à chaque conteneur en fonction de son besoin spécifique.

5.3.3 Implémentation dans le simulateur

Le routage se fait via l'agent de l'Acheminement qui calcule le chemin complet, de chaque conteneur depuis son origine jusqu'à sa destination. Ceci n'empêche de pouvoir modifier le chemin initialement calculé si une possibilité d'amélioration de performances se présente (cf. protocole ou agent de Transport).

Le calcul du chemin est une optimisation vis-à-vis d'un paramètre qui dépend du scénario de simulation, qui peut être :

- La distance : qui correspond à la distance réelle entre source et destination (longueurs additionnées des différents tronçons de routes ou rails en km)
- Le temps (temps de trajet + un forfait de 2 heures par passage par Nœud)
- Les émissions de CO₂ en transport.

La Figure 49 présente un aperçu de l'heuristique A* implémenté dans notre simulateur. (Il s'agit uniquement d'un aperçu, sa compréhension étant difficile vu que cet algorithme n'est pas intuitif dans sa construction de la solution).

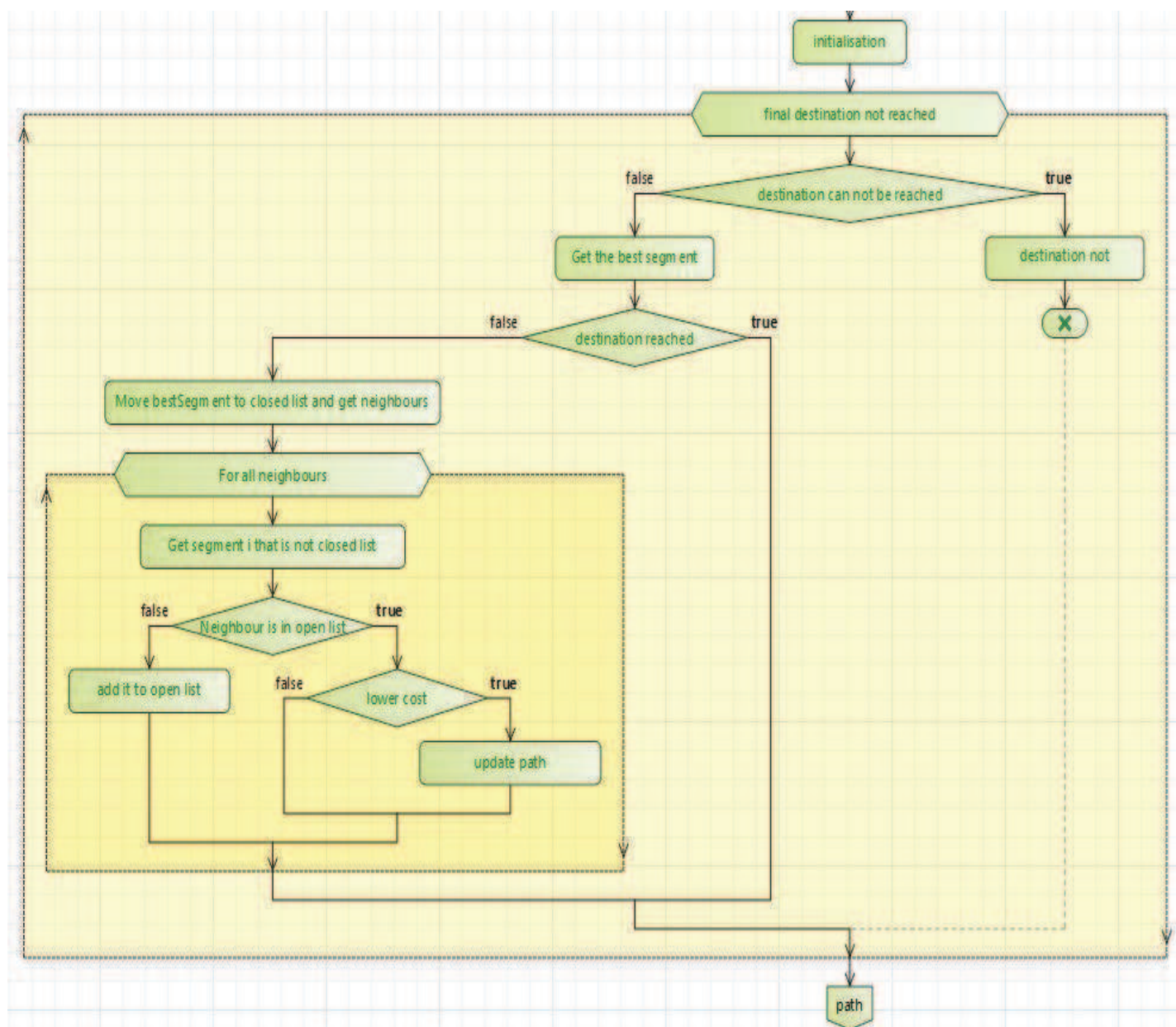


Figure 49: Aperçu du processus d'acheminement des conteneurs implémenté dans le simulateur

5.3.4 Améliorations possibles du protocole de routage

Comme pour la conteneurisation, plusieurs niveaux d'amélioration sont possibles.

Premièrement, le choix d'une heuristique pour trouver le meilleur chemin, qui est certes un gage de rapidité, peut perdre en précision. Ainsi il serait plus intéressant de considérer un algorithme plus performant que A*.

Ensuite, la sélection du chemin se fait via un unique critère qui peut être de délais, de temps ou d'émission. Il serait intéressant de combiner plusieurs critères ensembles, passant d'une problématique monocritère à une problématique multicritères et ce pour chaque conteneur qui le requiert.

Puis, dans une optique générale, il convient de considérer le caractère en partie « ad-hoc » du réseau car des prestations non permanentes peuvent être ajoutées et mises en compétition, contrairement à nos hypothèses. Dans ce cas, les prestations de transport seraient personnalisées pour une partie des moyens de transport. On pourrait alors imaginer que le choix du parcours d'une expédition dépende des capacités restantes des différents moyens de transport dans le réseau et de leurs horaires mais aussi d'un segment ad hoc monté en complément.

Finalement, si on considère plusieurs niveaux de conteneurs, la détermination de la route devient beaucoup plus compliquée, mais en même temps plus intéressante. En effet, on aurait des conteneurs encapsulables les uns dans les autres. Et dans ce cas, la détermination de la route pour un conteneur au niveau d'un nœud peut dépendre de ce qu'il y a autour. Car il se peut que faire un détour par rapport au chemin le plus court soit plus performant car d'autres conteneurs viendront s'imbriquer, remplissant davantage les conteneurs de niveau supérieur et/ou les moyens de transport.

D'autres pistes d'améliorations peuvent être proposées, mais devant la complexité de cette problématique vu le nombre de paramètres intervenants, nous avons choisi, dans le cadre de la simulation, de simplifier raisonnablement le problème.

5.4 Groupage des conteneurs et affectation aux moyens de transport

L'objectif de ce processus est de remplir aux mieux les moyens de transport et de minimiser les flux. De même que pour les deux autres protocoles, des pistes d'amélioration sont possibles.

5.4.1 Protocoles de groupage et d'affectation aux moyens de transport

A chaque nœud, hormis la destination finale, les conteneurs sont positionnés dans autant de files d'attente qu'il y a de schémas logistiques pour atteindre les nœuds qui y sont directement connectés (Figure 50). Pour chacune de ces files d'attente qui peuvent être vues comme des quais de départs, il s'agit de sélectionner les conteneurs de manière à remplir au mieux les moyens de transport. Nous prenons l'hypothèse que l'on peut disposer autant de moyens dont on a besoin. Cette hypothèse est plausible devant le nombre de transporteurs prêts à servir les demandes de leurs clients aujourd'hui. Ce problème d'affectation des conteneurs à des moyens de transport de façon à en utiliser un minimum est un problème bien connu : il s'agit du problème de bin-packing. On proposera une solution à ce problème dans le paragraphe suivant.

Le protocole choisi pour répondre à ces exigences est détaillé ci-dessous.

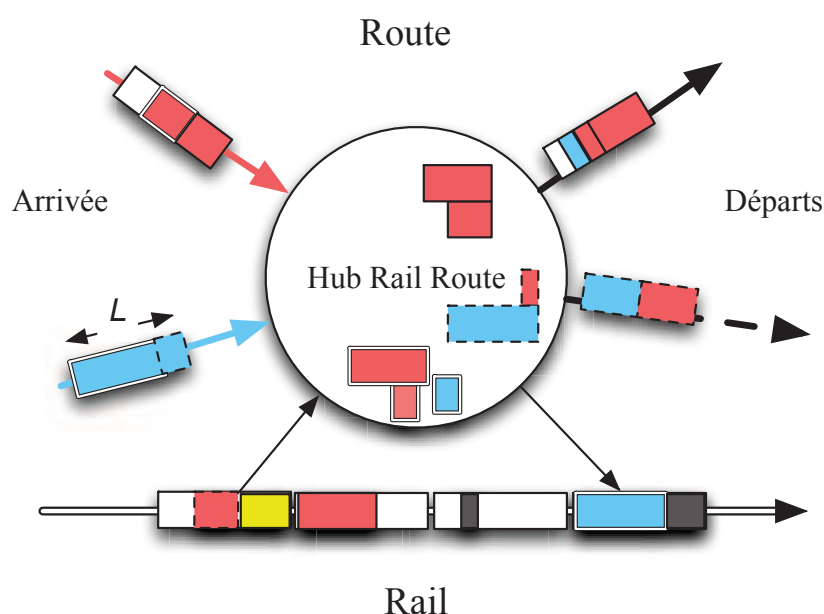


Figure 50: Fonction du passage par un hub multimodal (couleur = origine, trait = destination)

Considérons qu'une liste de moyens a été créée, via la résolution du problème de bin-packing, auxquels des conteneurs sont affectés. Afin d'augmenter avec le temps d'attente les opportunités d'un meilleur remplissage, nous avons convenu de fixer une limite de taux de remplissage en dessous de laquelle ces moyens devraient attendre d'éventuels arrivées d'autres conteneurs. Dans la simulation nous avons fixé cette limite à 90% de remplissage en volume ou en poids pour un camion (premier des deux atteint), et à 80% de remplissage en volume pour un train. En dessous de cette limite, les moyens de transport seront considérés

comme pas « suffisamment remplis » et ne partiront pas. A contrario, au-dessus de cette limite, ils seront chargés des conteneurs qui leurs ont été affectés et partiront.

Avec ce raisonnement, il est possible que des conteneurs et des départs se retrouvent bloqués dans un hub car ils n'ont pas eu la possibilité d'être affectés à des moyens « suffisamment remplis ». Nous avons ainsi fixé un délai d'attente maximum, au-delà duquel le conteneur sera prioritaire et dit à caractère « urgent ». Une fois ce délai dépassé, nous considérons que le conteneur doit quitter le nœud. Ainsi, dans ce cas, même si le moyen auquel il sera affecté n'est pas « suffisamment rempli » (à hauteur de 80% ou de 90% de remplissage), un nouveau chemin est calculé pour les conteneurs concernés (optant pour un camion au lieu d'un train par exemple). Ou, s'il n'y a pas de solution alternative, le départ est forcé, indépendamment de la charge, afin d'éviter des attentes illimitées. Dans le modèle de simulation, nous avons testé plusieurs valeurs de paramétrages comme pour les délais maximum d'attentes. Nous avons constaté par exemple, qu'un temps d'attente maximum pour un conteneur de 12 heures par rapport à 3 heures n'avait pas vraiment amélioré le taux de remplissage mais qu'il altérerait les délais, alors qu'avec un délai de 2 heures les remplissages étaient significativement moins bons. De même pour les limites de remplissage considérées (80% et 90%). Les résultats suivants sont basés sur 3 heures de temps d'attente maximum à chaque nœud et 90% de charge minimale pour un départ immédiat. Il permet le départ d'un camion semi-remorque européen avec un conteneur de 12 m (en longueur car les autres dimensions seront pleines) sur une remorque de 13.2 m.

D'autre part, le protocole de groupage cherche non seulement le regroupement des conteneurs vers le prochain nœud commun, mais aussi pour les nœuds communs suivants et notamment les plus lointains, créant ainsi des flux directs vers ces destinations communes. En effet, s'il y a suffisamment de conteneurs pour charger complètement les moyens de transport, nous pouvons éviter les déchargements, les tris et les chargements inutiles dans les nœuds suivants, en autorisant la remorque ou le wagon à poursuivre son chemin vers la destination finale commune via des transits. C'est ainsi que le chemin sélectionné peut alors être modifiée pendant le transport. Cette opération concerne le transport routier et se fait en amont du protocole du chargement en analysant les différents chemins prévus des conteneurs pour une file d'attente (quai de départs) et en essayant de regrouper des conteneurs par destinations communes pour les transporter via des camions pleins uniquement. Dans le cas d'une

multiplicité des destinations communes, le protocole choisi en priorité la plus lointaine, pour y appliquer l'algorithme de chargement.

Comme on peut le voir, le protocole de groupage et d'affectation aux moyens de transport est très lié à celui de l'acheminement. En effet, nous utilisons la capacité des moyens de transport qui permet de passer d'un service ferroviaire à un service routier par exemple, voir un service plus performant en fonction de la charge instantanée du réseau.

5.4.2 Le problème du Bin-Packing

Une fois les conteneurs regroupés par files d'attentes (quais de départs), il faut les associer à des moyens de transport. La question ici est de savoir comment optimiser les « taux de remplissage », minimisant ainsi le nombre de moyens utilisés. Ceci peut être modélisé comme un problème de bin-packing: disposant d'un ensemble d'objets (ici des conteneurs), de leurs tailles et poids, ainsi que d'un ensemble de sacs (moyens de transport) et de leurs capacités, comment trouver le nombre minimum de sacs de sorte que tous les objets soient affectés à un sac ?

Le problème de bin-packing, qui découle de la recherche opérationnelle et de l'optimisation combinatoire, a été approché à partir des années cinquante par de nombreux chercheurs. Nous citons ici quelques travaux importants (Gilmore et al. 1961, Gilmore et al. 1963). Dans notre cas, le problème est simplifié. Tout d'abord, nous sommes en face d'un problème unidimensionnel, car les conteneurs sont modulaires (ayant la même section, mais de longueur différente), voir Tableau 16.

Deuxièmement, il y a un seul type de sacs en même temps (camion ou train). Enfin, notre problème est dynamique car il arrive en permanence de nouveaux conteneurs sur le hub, c'est pourquoi nous avons choisi une approche réactive qui vise à traiter ce problème en permanence et à utiliser les solutions satisfaisantes trouvées pour faire évoluer l'état du problème : dès qu'un chargement est opportun il est réalisé et le problème mis à jour. Voici donc la formulation mathématique de notre problème:

$$\min \sum_{j=1}^k y_j \quad (\text{Eq.1})$$

y_j chargement de conteneurs dans le moyen de transport j (1 si le moyen j est utilisé, sinon 0)

x_i^j chargement de conteneurs dans le moyen de transport j

c_i taille du conteneur i et C est taille du moyen de transport, $i \in \{1, \dots, k\}$

w_i poids du conteneur i et W est la capacité du moyen de transport en poids, $i \in \{1, \dots, k\}$

$$\sum_{i=1}^k x_i^j c_i \leq C y_j, \forall j \in \{1, \dots, k\} \quad (\text{Eq.2})$$

$$\sum_{i=1}^k x_i^j w_i \leq W y_j, \forall j \in \{1, \dots, k\} \quad (\text{Eq.3})$$

$$\sum_{j=1}^k x_i^j = 1, \forall i \in \{1, \dots, k\} \quad (\text{Eq.4})$$

$$x_i^j \in \{0,1\}, \forall i \in \{1, \dots, k\}, \forall j \in \{1, \dots, k\}$$

$$y_j \in \{0,1\}, \forall j \in \{1, \dots, k\}$$

La fonction-objectif est de maximiser le nombre de conteneurs chargés par départ (Eq.1). Nous avons également trois contraintes assurant le non dépassement des capacités en volume (longueur) et en poids des moyens de transport (Eq.2 et Eq.3), et que chaque conteneur soit affecté une et une seule fois à un moyen de transport (Eq.4).

Ce problème est un problème d'optimisation NP-complet, et la difficulté à trouver la solution optimale croît de façon exponentielle avec le nombre de conteneurs à traiter. En effet, la programmation linéaire, par l'intermédiaire de l'algorithme Branch and Bound par exemple, pourrait être une solution méthodologiquement irréprochable. Mais la performance d'une telle méthodologie est limitée à de petits problèmes. Pour des problèmes de plus grande échelle, il convient d'utiliser des approches heuristiques pour obtenir des solutions approchées dans un délai raisonnable. Parmi les algorithmes les plus utilisés dans ce genre de problème nous citons les suivants (Johnson et al. 1974, Kellerer et al. 2004):

- First Fit (FF): Au départ, un seul sac est considéré, et les objets sont chargés dans le sac par ordre d'arrivée. Quand il n'y a pas assez de place dans le premier sac pour un objet donné, il sera chargé dans un second sac, mais sans fermer le premier. Ensuite, l'objet suivant va essayer d'entrer dans le premier sac avant le second, à moins que le premier soit complet et donc fermé, et ainsi de suite.

- First Fit Decreasing (FFD): Sachant que le critère selon lequel on trie les objets est crucial pour la qualité de la solution (Johnson et al. 1974), la méthode FFD consiste à trier les objets dans l'ordre décroissant de leur taille, puis de les charger dans les sacs par ordre, en utilisant la méthodologie Fit First.
- Best Fit (BF): Comme dans la stratégie de FF, les objets sont toujours triés selon leur ordre d'arrivée. La différence est que dans BF un objet va essayer en premier lieu d'entrer dans le sac le plus rempli (parmi tous les sacs ouverts), et s'il n'y a pas assez de place il va essayer le second le plus rempli, et ainsi de suite.
- Best Fit Decreasing (BFD): Le BFD diffère de la BF du fait que les objets sont triés dans un ordre décroissant de leur taille.

En général, les méthodologies FFD et BFD donnent de meilleures solutions que les autres (Johnson et al. 1974, Simchi-Levi 1994). Nous avons expérimenté ces deux méthodologies dans notre modèle et nous avons constaté que leurs résultats sont très proches. Cependant, le FFD a besoin de moins de temps de calcul, car l'opération de tri des sacs (en taux de remplissage) n'est pas nécessaire ici. Sur la base de ces arguments, nous avons choisi d'implémenter l'algorithme FFD dans notre modèle.

Pour avoir un panel complet de méthodes heuristiques développées au sujet du problème de bin-packing, le lecteur peut se référer à (Coffman Jr et al. 1996).

5.4.3 Implémentation dans le simulateur

Ce protocole de groupage des conteneurs et d'affectation aux moyens de transport est implémenté dans l'agent Transport au niveau de chaque nœud.

L'algorithme en question place tout d'abord tous les conteneurs ayant la même prochaine destination et qui utilisent a priori le même type de moyen de transport (train ou camion) sur un même quai virtuel. Ainsi, il y aurait un quai virtuel par prochaine destination et par type de moyen de transport. Techniquement, chaque quai virtuel représente une liste de conteneurs.

La question qui se pose est de savoir comment seront remplis les moyens de transport. Les étapes implémentées concernant les protocoles de groupage suivent l'ordre suivant :

1. La première étape, qui concerne uniquement les conteneurs qui prévoient de partir en camion, est de regrouper les conteneurs d'un même quai virtuel vers la destination commune la plus lointaine. En effet, l'agent Transport regardera pour chaque

conteneur le chemin prévu et fera en sorte, si possible, de créer des camions complets qui iront directement vers leur destination commune la plus lointaine. Les camions ainsi composés partiront vers leurs destinations en réalisant des « transits » dans les nœuds intermédiaires évitant ainsi des manipulations (déchargements, tris, chargements, etc.) inutiles. Ces transits auront pour objectif de faire le relais entre différents tracteurs et chauffeurs.

2. Ensuite, pour les conteneurs non traités (non transportés pour des transits) dans chaque quai, l'agent créera des moyens de transport auxquels ils seront affectés. Il est à noter que cette affectation n'est pas définitive. Il s'agit d'un bin-packing problem, qui comme nous l'avons déjà vu, consistait à affecter les conteneurs à un nombre minimum de camions ou de trains, respectant à la fois les contraintes en volume et en poids. Par contre il ne prend pas en compte l'équilibre des charges sur le moyen.
3. L'agent Transport ayant aussi comme objectif de chercher à mieux remplir les moyens de transport et à respecter l'urgence d'expédition de chaque conteneur, il suit les protocoles suivants pour chaque moyen de transport crée :
 - S'il est considéré comme « suffisamment rempli ». Il sera donc chargé avec les conteneurs qui lui sont affectés et partira directement vers la prochaine destination commune à tous ces conteneurs.
 - Si ce moyen de transport est un camion et qu'un ou plusieurs conteneurs à caractère « urgent » y sont affectés, il sera chargé puis expédié, quel que soit son taux de remplissage. Dans le cas d'un train, on considère qu'il ne peut partir sans être « suffisamment rempli ». Ainsi, les conteneurs à caractères « urgent » seront re-routés en utilisant la route, se retrouvant ainsi dans d'autres quais virtuels (associés à des camions) et les mêmes protocoles de transports seront ensuite appliqués.
 - Sinon, le service de transport sera annulé et les conteneurs s'y trouvant seront désaffectés et reconsidérés sur leur quai virtuel. Dans ce cas, le processus de la création de service de transports à partir de chaque quai se réitérera (étape 1 à 3) dès que de nouveaux conteneurs arriveront sur le même quai, ce qui permettra d'améliorer le taux de remplissage des moyens de transport (qui pourraient dès lors partir).

Ensuite, une fois que les conteneurs expédiés par des camions ou par des trains arrivent à destination, les moyens de transport correspondants seront traités selon le processus suivant :

- Dans le cas d'un moyen en « transit » qui n'est pas arrivé à la destination finale prévue (destination finale commune aux différents conteneurs), il est redirigé vers sa prochaine destination (celle du plus grand et à défaut le plus lourd conteneur lui étant affecté avant l'expédition initiale) après le temps d'arrêt nécessaire au transit.
- Sinon, les conteneurs sont livrés au nœud via un déchargement. Ces conteneurs feront partie de ceux reçus par le nœud en cours et suivront le processus de tri par quais virtuels puis seront expédiés. S'il s'agit du nœud de destination finale les conteneurs sont simplement livrés.
- Le moyen de transport une fois vide, ne sera plus considéré comme existant dans la simulation. Car le trajet de retour de camion et la gestion de flotte ne sont pas étudiés ici.

La Figure 51 présente un aperçu de ce processus sous notre modèle de simulation.

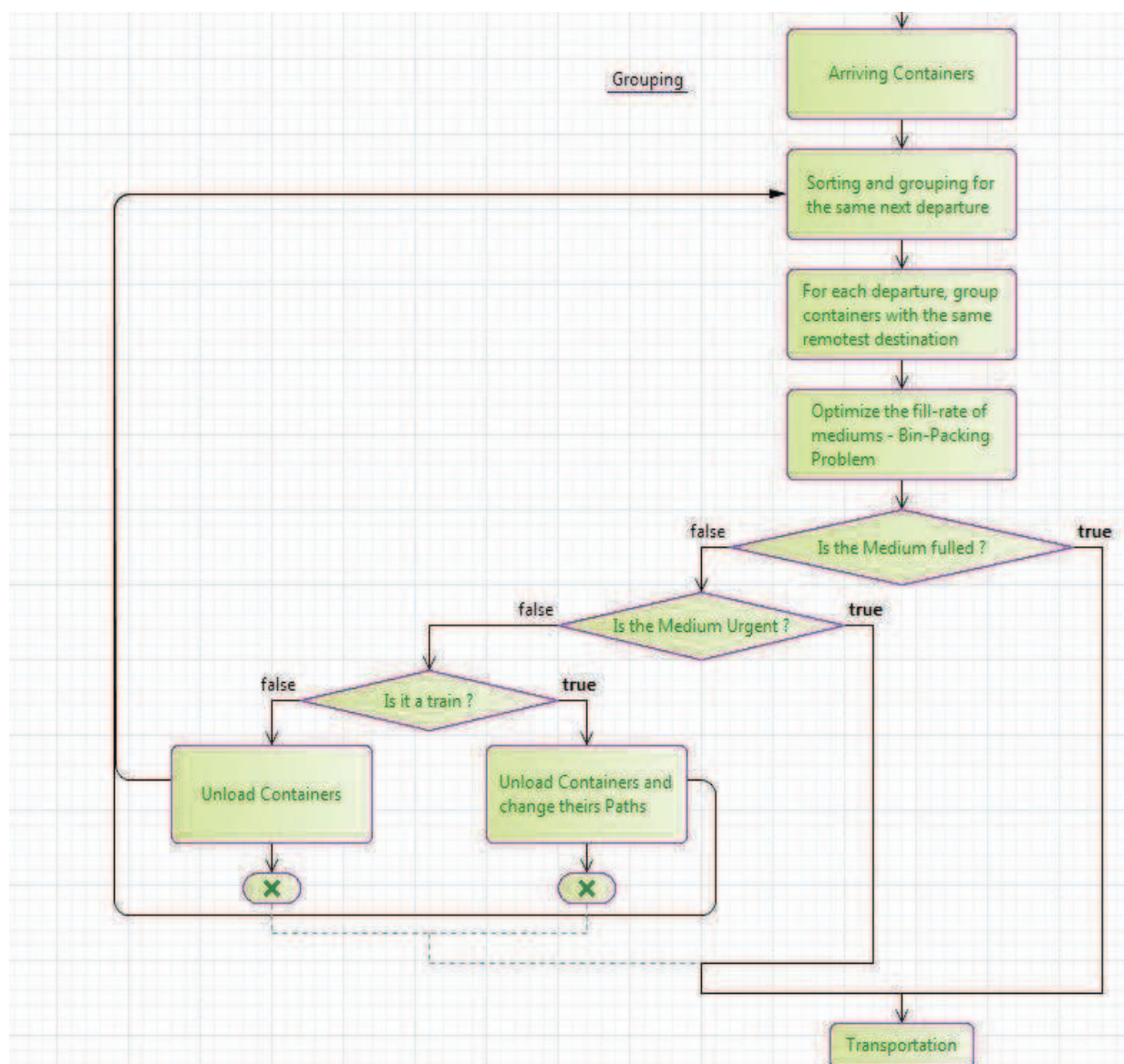


Figure 51: Aperçu du processus degroupage des conteneurs et d'affectation au moyens de transportimplémenté dans le simulateur

5.4.4 Améliorations possibles du protocole de groupage et d'affectation aux moyens de transport

Des améliorations peuvent donc être proposées surtout dans le cadre de la mise en œuvre réelle de ce type d'opérations.

Une première piste d'amélioration serait d'utiliser des algorithmes plus performants pour la résolution du problème de Bin-Packing, optimisant ainsi au mieux l'utilisation des moyens de transport. De plus, en cas d'utilisation de plusieurs niveaux de conteneurs, les uns imbriqués

dans les autres, on aurait des conteneurs de différentes tailles et le problème deviendrait multidimensionnel.

Ensuite, afin d'augmenter les opportunités d'un meilleur remplissage, nous avons donné la possibilité aux moyens de transport d'attendre l'éventuel arrivée d'autres conteneurs. Il se pourrait donc que des camions soient mobilisés quelques heures de plus, sans que d'autres conteneurs n'y soient chargés. Afin d'éviter cette possible perte de temps, on pourrait améliorer ce protocole en prévoyant un système de communication permettant aux différents conteneurs de transmettre des informations tels que leurs positionnements et leurs trajets prévus aux PI-nœuds, en temps réel. Ceci donnerait la possibilité de savoir à l'avance, si un moyen de transport a intérêt ou non à attendre d'autres conteneurs. On pourrait aller plus loin en intégrant un protocole de décision au niveau de chaque moyen de transport, pour savoir s'il serait plus performant (en coûts, en émissions, en temps, etc.) d'attendre ou non, un ou des conteneurs. Cette décision se ferait en fonction des temps d'attentes prévus pour l'arrivée des conteneurs en questions et des objectifs de chaque conteneur déjà affecté au moyen. Pour chacun de ces conteneurs (affectés au moyen), une analyse devra être réalisée pour déterminer ses attentes globales (exemple : délais maximum d'arrivée à destination finale), et les marges qu'elle aurait ainsi au niveau de chacun des nœuds du trajet restant prévu. D'autre part, nous avons fixé un taux de remplissage dit « suffisant », à savoir à 90% de remplissage en volume ou en poids pour un camion, et à 80% de remplissage en volume pour un train (pas de contrainte de poids). On pourrait, dans cette même optique d'amélioration, éliminer ce taux et ne considérer que l'ensemble des conteneurs à disposition au niveau du nœud et ceux qui seraient sur la route en direction de ce même nœud, pour décider du départ ou de l'immobilisation du moyen de transport. On comprend aisément que ce problème fait intervenir de nombreuses variables interdépendantes pour définir un départ ce qui complexifie fortement la modélisation et sa résolution.

Afin de limiter le nombre de manutentions, le protocole choisi tente de regrouper des conteneurs vers les destinations les plus lointaines possibles. Cette volonté de regroupements est très intéressante, mais elle est limitée ici à des regroupements chargeant des camions complets. On pourrait l'améliorer en réalisant des regroupements quitte à ce que le moyen ne soit pas rempli totalement, s'il s'avère plus intéressant, voire prévoir de le compléter en cours de cheminement. Une telle décision nécessite d'analyser les différentes possibilités de regroupements au niveau d'un ensemble des nœuds du réseau ad-hoc, ce qui n'est possible que si un moyen de communication est mis en œuvre pour le partage des informations

relatives aux positionnements et aux trajets restant des conteneurs. Ici encore on voit des possibilités d'amélioration certaines.

On a vu ici une liste d'améliorations possibles, certes difficiles à modéliser dans certains cas, mais qui s'avèrent intéressantes. Cette liste n'est pas exhaustive et d'autres améliorations sont possibles. On retiendra simplement que l'intérêt des protocoles que l'on propose ici est de donner des règles de fonctionnements logiques, efficaces et représentatives des attentes globales de la logistique, permettant de simuler un PI et d'évaluer ses performances potentielles.

5.5 Conclusion

Afin de mesurer les performances potentielles d'un Internet Physique, nous avons en premier lieu, dans les chapitre 3 et 4, étudié des éléments clefs de l'interconnexion des réseaux de l'Internet, et via des transpositions mixées à des adaptations aux contextes du transport de marchandises, nous avons réussi à définir les premières règles de fonctionnement du routage et du transport dans un Internet Physique.

Ces concepts, n'étant pas suffisants pour établir des processus opérationnels, nous avons développé des protocoles. Ils concernent la procédure de conteneurisation, les algorithmes de détermination des chemins et le groupage des conteneurs dans les hubs.

Il ne faut cependant pas voir les méthodes proposées ici comme des solutions définitives aux questions posées mais comme des solutions de base susceptibles d'être perfectionnées par des travaux ultérieurs. Ces protocoles, une fois implémentés dans le simulateur, nous permettront de mesurer les performances de ce nouveau système logistique.

C'est ainsi que lors du prochain chapitre, nous présenterons le modèle de simulation que nous avons développé, les différentes données utilisées, les indices de mesures de la performance que nous avons sélectionnés, les résultats obtenus et les analyses qui en découlent. On constate cependant dès à présent que si la métaphore de l'Internet était utile à haut niveau l'implémentation des concepts requiert des solutions spécifiques qui s'éloignent des protocoles d'Internet pour se rapprocher des problématiques de la logistique et du transport.

Chapitre 6 : Potentiel d'un réseau interconnecté

6.1	Modèle de simulation et méthodologie.....	170
6.2	Les flux de marchandises considérés	172
6.2.1	Les flux	173
6.2.2	Réseaux d'approvisionnements actuels	174
6.3	La logistique actuelle : réseaux et modélisation	176
6.3.1	Modélisation de la logistique actuelle	177
6.3.2	Données de l'infrastructure actuelle.....	178
6.4	L'Internet Physique : Réseaux et protocoles.....	180
6.4.1	Réseau Internet Physique – usines / entrepôts / DC	182
6.4.2	Réseau Internet Physique liant directement les usines aux centres de distribution	183
6.5	Evaluation des performances de l'interconnexion des réseaux logistiques	185
6.5.1	Indices de performances mesurées	185
6.5.2	Les scénarios simulés.....	188
6.5.3	Résultats obtenus	191
6.6	Conclusion	214
6.6.1	Des premiers résultats qui montrent des gains significatifs	215
6.6.2	Malgré les limites de cette première simulation.....	216
6.6.3	Les nouvelles perspectives pour la simulation	216

Chapitre 6. Potentiel d'un réseau interconnecté

Afin de démontrer le potentiel de l'Internet Physique par rapport au modèle actuel, nous avons choisi de simuler différents scénarios et d'analyser les résultats obtenus. La simulation prend place à mi-chemin entre un modèle analytique très macro (Ballot et al. 2011, Sarraj et al. 2012b), et une étude de faisabilité avec la mise en place d'un démonstrateur sur des flux pilotes.

On attend de cette démonstration qu'elle soit ancrée au niveau des flux les plus proches possibles de la réalité de manière à crédibiliser les enjeux. Il a donc été fait le choix de s'appuyer sur une base de données de flux réels de la grande distribution déjà utilisée dans des travaux précédents concernant la mutualisation (Pan et al. 2011). Cette base de données sera caractérisée pour donner un ordre de grandeur des flux traités, ce qui permet également d'en situer les enjeux établis.

L'objectif est de proposer une méthode d'évaluation de l'Internet Physique. En effet, si l'on peut penser que la « mutualisation » généralisée des flux va dans le sens de l'amélioration des performances, notamment environnementales, il n'en reste pas moins que de nombreuses questions se posent concernant le niveau atteint et d'éventuels effets secondaires indésirables. Par exemple :

- Les ruptures de charge ne seront-elles pas trop nombreuses, ce qui pourrait affecter les coûts et les délais ?
- L'amélioration des taux de remplissage permettront-ils de compenser les coûts de conteneurisation et de passage par les hubs ?
- Les volumes permettront-ils un report modal efficace et donc des réductions significatives des émissions ?
- Quelle sera la qualité de service ?

Le but de cette recherche est d'apporter des réponses chiffrées et contextualisées à ces questions. Ainsi, nous présentons, dans une première partie, le modèle de simulation et la méthodologie suivie. Nous présentons ensuite les flux réels que nous avons utilisés comme données d'entrée de notre modélisation. Puis nous proposons une modélisation représentant la pratique actuelle en termes de transport et qui est nécessaire pour notre simulation, ainsi qu'un aperçu de la base de données de l'infrastructure supportant les prestations logistiques : routes et voies ferroviaires. Puis le réseau de l'Internet Physique utilisé sera présenté. Nous

présentons alors les indices de performances choisis, les scénarios simulés, les résultats obtenus et leur analyse.

6.1 Modèle de simulation et méthodologie

La conception de l'Internet Physique en est à ses débuts, ce qui signifie que de nombreuses pistes sont à explorer et que de nouveaux éléments ou protocoles pourraient être développés ou améliorés. Pour quantifier l'impact de différentes hypothèses et méthodes, il est nécessaire de disposer d'un outil de simulation prévu à cet effet, c'est-à-dire programmé de manière générique pour prendre en compte la variation de paramètres ou même intégrer de nouvelles méthodes de calcul. Ceci n'est possible que si cela a été prévu dès le départ. Le modèle de simulation développé ici l'a été dans cette perspective. Il sert à évaluer l'impact des éléments et protocoles conçus pour le réseau Internet physique par rapport aux réseaux logistiques actuels. Le modèle de simulation est un système multi-agents et basé sur l'approche par événements discrets, implémentés dans le logiciel de simulation AnyLogic de XJ Technologies dont un aperçu est démontré dans la Figure 52.

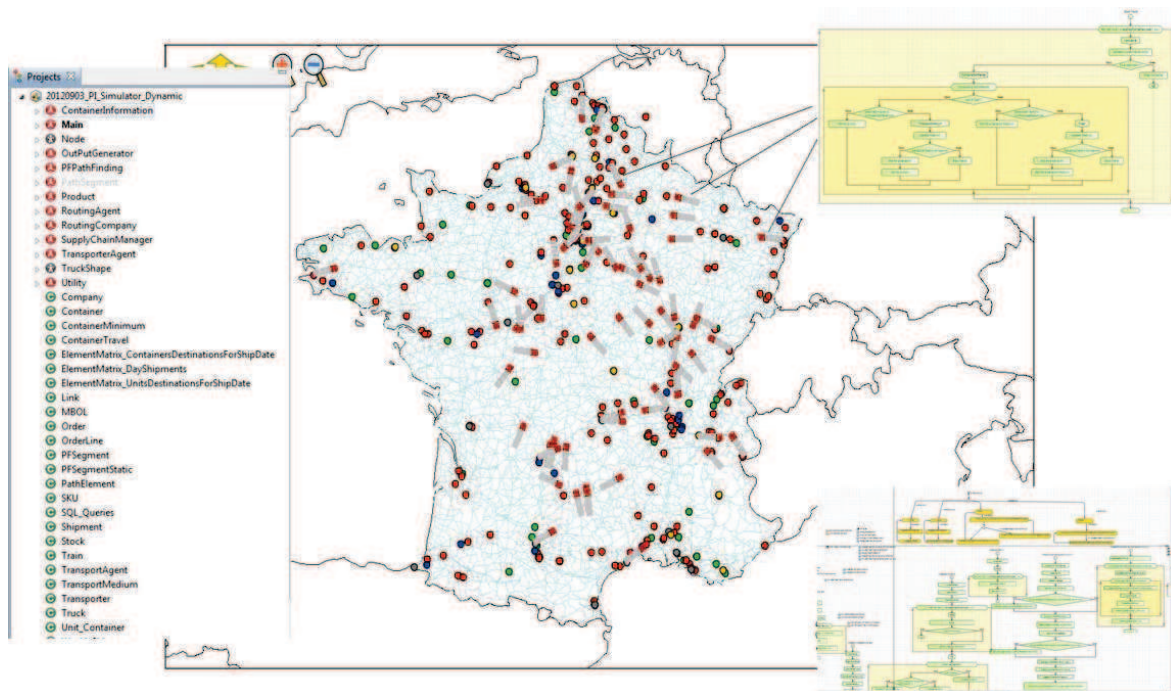


Figure 52: Interfaces du simulateur

Le logiciel de simulation Anylogic est construit dans un environnement de programmation en langage Java. Il prend donc en charge des extensions de codes nécessaires dans ce même langage (Java) et il a été interfacé aux sources de données externes.

Le modèle développé sur ce logiciel lit tout d'abord les données des réseaux routiers et ferroviaires, aux sites et celles relatives aux commandes. Ensuite, le modèle de simulation exécute avec les agents programmés à chaque nœud les protocoles ainsi implémentés. Enfin il permet d'écrire sur une base de données les contenus et parcours des conteneurs.

La Figure 53 représente le process du modèle de simulation, et donc la méthodologie suivie. Ainsi nous avons en parallèle une partie consacrée au scénario représentant la pratique courante du transport dans le réseau de distribution actuel (dit scénario de référence) partie supérieure de la figure, et une seconde pour les scénarios de l'Internet physique, partie inférieure de la figure.

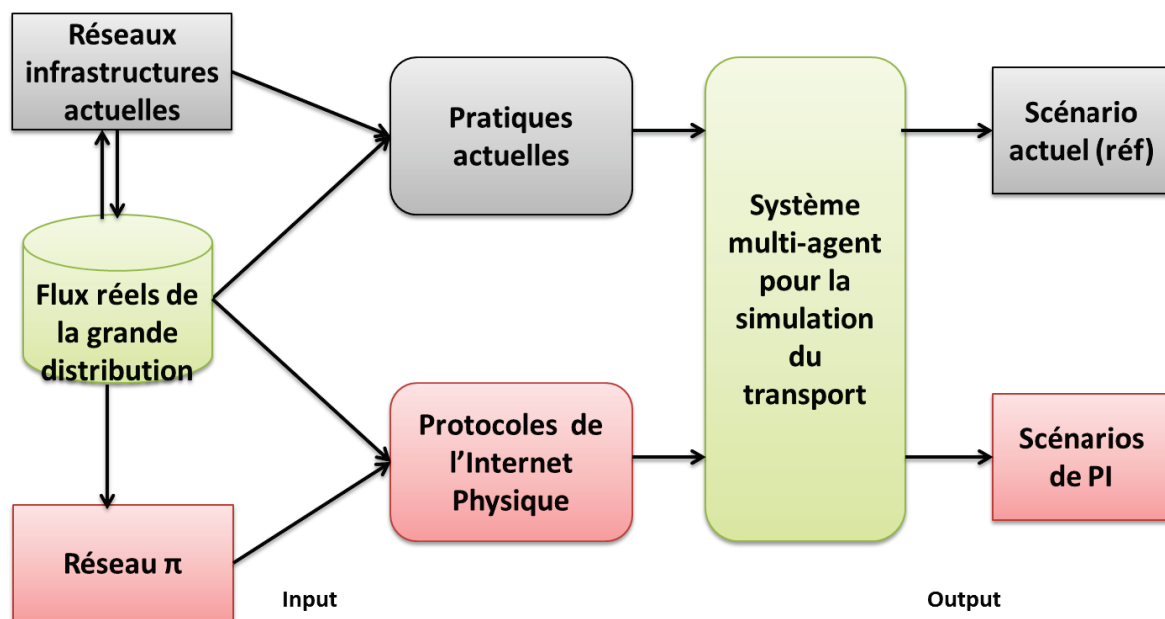


Figure 53: Processus de la simulation

Pour la première partie, nous avons comme bases de données d'entrée des commandes réelles pour des produits de grande consommation en France et le réseau actuel (une cartographie réelle des sites logistiques). Nous avons aussi implémenté dans le modèle les pratiques actuelles en matière de transport (palettes, chargement, transbordement, déchargement, etc.), et qui feront l'objet du prochain paragraphe. Après le lancement de la simulation, nous obtenons un certain nombre de données correspondant aux différents transports des palettes

ainsi que leurs contenus. Ces données se présentent sous forme d'un fichier Access. A partir de ce fichier, nous mettons en place différents indicateurs de performance ou KPIs (Key Performance Indicators) qui mesurent la performance des scénarios.

Pour la deuxième partie, nous utilisons les mêmes flux, mais avec cette fois-ci, à la place du réseau actuel, le réseau Internet physique qui sera présenté au paragraphe 6.4. Nous avons implémenté les protocoles de PI, précédemment définis (chapitre 5), dans le simulateur et finalement nous obtenons comme sortie les KPI de l'Internet physique pour différents scénarios.

Cette méthodologie nous permet de comparer la performance du réseau logistique actuel et celle du réseau Internet physique, de valider notre modèle en comparant les résultats de simulation des pratiques actuelles en matière de logistique avec les données réelles, et aussi d'analyser le potentiel d'Internet Physique et avec différentes variantes d'éléments et de protocoles. La récupération des résultats en deux temps permet même de calculer de nouveaux indicateurs ultérieurement à partir des enregistrements des événements de la simulation.

Au niveau des données il existe trois sources. La première est la base de données représentant les flux entre usines, plateformes et centres de distributions, ainsi que les réseaux d'approvisionnements.

La deuxième est une base de données comprenant les infrastructures actuelles (routes, rails).

La troisième source est un réseau PI. Cette base de données a fait l'objet d'un travail de recherche effectué par notre partenaire EPFL-Lausanne en Suisse lors du projet de recherche mené avec le PREDIT. Pour aboutir à ce type de réseau, celui-ci a utilisé les deux premières bases de données, à savoir celle du réseau d'approvisionnement et celle de l'infrastructure actuelle, et a ensuite appliqué des heuristiques d'optimisation permettant d'aboutir à des réseaux PI. Cette optimisation a fait l'objet d'un développement de logiciel spécifique en Java™ (Ballot et al. 2012a, Ballot et al. 2012b).

6.2 Les flux de marchandises considérés

Les flux que nous avons utilisés pour notre simulation concernent les expéditions entre usines, plateformes et centres de distributions de la grande distribution. Ils seront développés lors du

sous premier sous-paragraphe. Nous aborderons par la suite la question de la localisation géographique des origines et destinations de l'ensemble de ces flux.

6.2.1 Les flux

Comme mentionné précédemment, les flux utilisés pour notre démonstration sont des flux réels de produits de la grande distribution. Il s'agit de 3 familles de produits: liquides, épiceries et DPH (Droguerie, Parfumerie et Hygiène). La Figure 54 représente les emplacements des sites et les 4451 flux de 2 582 692 équivalents palettes qui opèrent indépendamment (environ 20% de part de marché de la grande distribution françaises pour les familles de produits considérés).

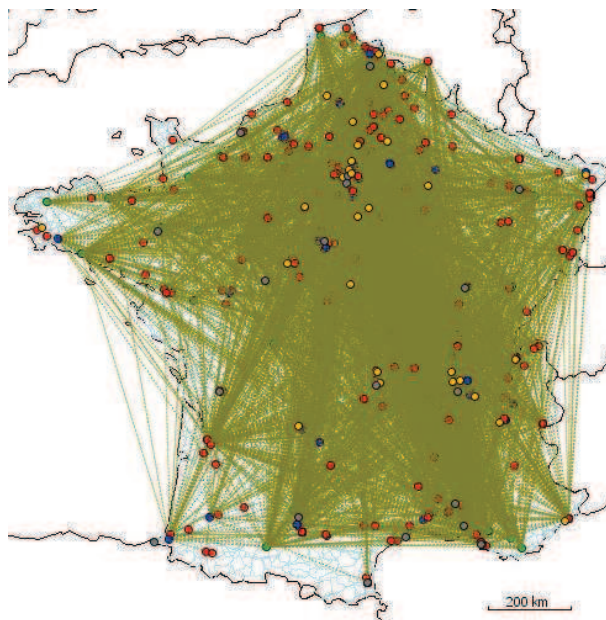


Figure 54: Flux et schémas logistiques actuels

Ces réseaux de schémas logistiques qui se chevauchent les uns sur les autres correspondent à des opérations réelles et composent le scénario de référence.

Cette même base de flux avec les mêmes quantités, origines et destinations est aussi utilisée pour les scénarios de l'Internet Physique. Seuls la conteneurisation et les trajets suivis par ces mêmes produits pour arriver à leurs destinations changent. Ainsi, les flux que nous utilisons ici sont basés sur le réseau actuel de la logistique, ce qui a tendance à réduire les performances de l'Internet Physique. En effet, on peut imaginer qu'un tel système pourrait induire des changements aux niveaux des tailles d'expédition, voire la demande elle-même. À

cet égard, les résultats obtenus en termes de performance de l'Internet Physique constituent d'avantage une borne inférieure et une condition nécessaire pour la phase de transition qu'un résultat optimisé par rapport à ce nouveau cadre.

Nous avons deux types de chaînes d'approvisionnement: des usines aux centres de distribution (DC) ou des usines aux entrepôts (WH) et puis de ceux-ci aux DC. Le Tableau 17 décrit les flux que nous considérons dans notre étude et leurs principales caractéristiques.

Tableau 17: Description des flux actuels

Catégories	Liquides	Epiceries	DPH
Nombre de produits	130	355	217
Nombre de fournisseurs	29	55	24

Caractéristiques des flux	Usines à DC	Usines à WH	WH à DC
Arcs	2 738	251	1 461
Dist. moyenne (km)	511	444	441
(écart type des dist. Moy.)	(276)	(302)	(262)
Commandes (en nombre)	56 710	22 730	37 604
Taille moyenne des commandes (Palettes)	19,77	32,30	19,20
(écart type tailles. com.)	(10,11)	(2,69)	(10,28)
ton	991 323	443 540	435 149
t.km	474 459 658	165 930 963	163 419 052

Nous remarquons que les flux sont importants, ce qui vient confirmer la nécessité d'algorithmes alliant à la fois rapidité d'exécution et qualité de solution pour le modèle de simulation.

6.2.2 Réseaux d'approvisionnements actuels

La chaîne logistique des produits alimentaires de la grande distribution est utilisée ici pour la démonstration car elle a l'avantage d'être très fortement implantée sur le territoire national à

travers de multiples sites industriels et de distribution. Par ailleurs ces chaînes comportent aussi bien de grands industriels que de très petites entreprises, pour autant nous étudions ici les flux des plus importantes d'entre-elles. Ceci implique des flux importants (des camions quotidiens) pour les grands sites et d'autres beaucoup plus faibles (quelques palettes sur les 12 semaines) pour des sites plus marginaux ou des produits spécifiques (beauté notamment).

Les bases de flux ont été construites à partir de celles de deux enseignes de la grande distribution et de leurs 100 premiers fournisseurs communs en volume dans les familles de produits d'épicerie (biscuits, conserves, pâtes, riz, etc.), de liquides (eaux, jus, vins soda, lait UHT, etc.) et de produits en Droguerie Parfumerie Hygiène (lessives, papier toilette, soins corporels, beauté, etc.). Ces chaînes ne comprennent ni les produits frais ni surgelés, traités à part, ni les produits de bazar, ni les produits de loisirs, de l'électroménager ou de l'habillement,.... Les flux présentés ci-après ne présentent donc que très peu de flux d'importation. Ce travail de construction des bases de flux a été mené dans le cadre du Club Déméter pour la logistique durable et correspond à 12 semaines de données.

Les réseaux d'approvisionnement actuels comprennent 303 usines, 57 entrepôts (en exploitation ou sous-traités à des 3PL) et 58 centres de distribution (en exploitation ou sous-traités à 3PL) dans tout le pays. La Figure 55 mentionne l'ensemble de ces sites qui, comme on peut le constater, sont situés en grande majorité sur le territoire national.

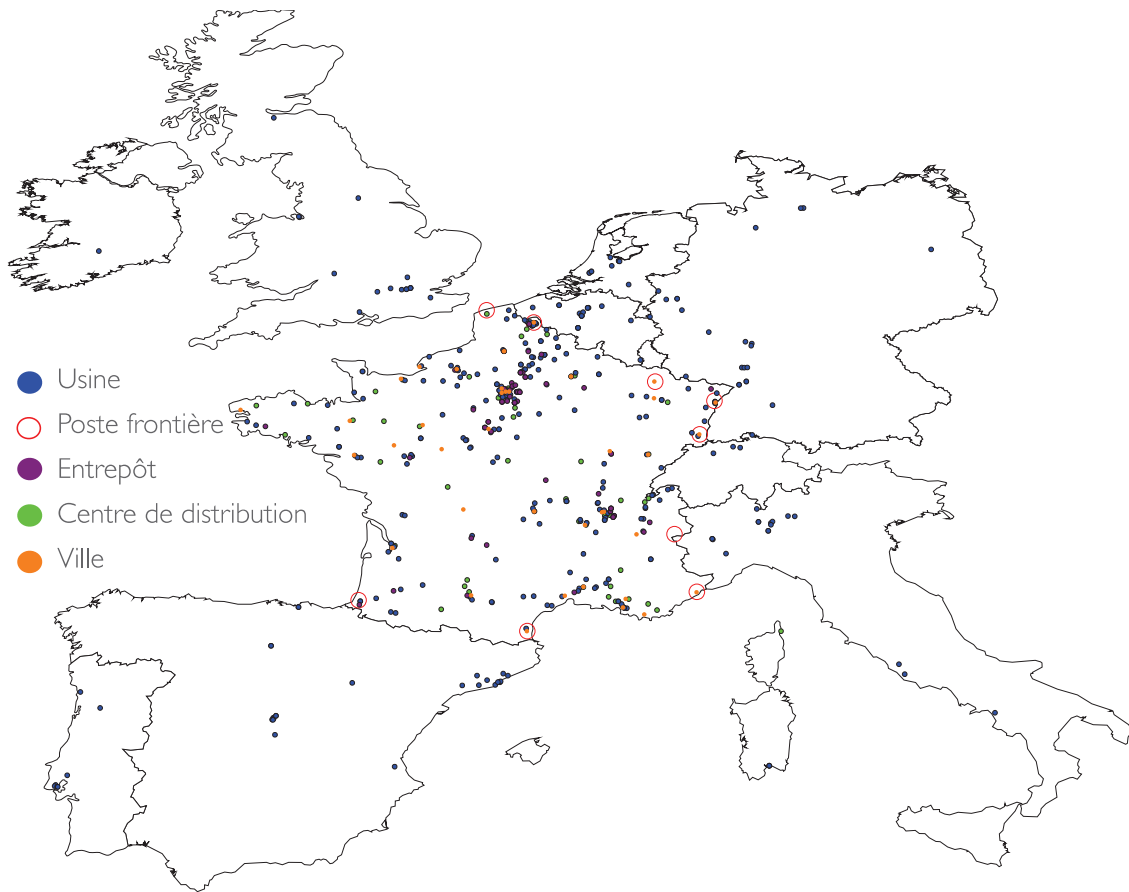


Figure 55: Localisation des sites de la base de données

Pour des raisons d'homogénéité du périmètre de comparaison, nous prenons en compte uniquement les flux à leur arrivée sur le territoire en cas d'origine extérieure. A cette fin, neuf points d'entrée sont définis comme postes frontières et sont donnés par la carte de la Figure 55.

6.3 La logistique actuelle : réseaux et modélisation

La simulation du réseau actuel nécessite tout d'abord la définition des modèles qui représentent la pratique actuelle en termes de transport et qui ont été implémentés dans le simulateur.

Ensuite, après avoir détaillé la première source de données, à savoir celle des flux et de la localisation des sites logistiques, nous présentons ici la troisième source. Il s'agit d'une base de données comprenant les infrastructures actuelles au sens large (routières, ferroviaires, fluviales) mais dont seules les composantes routière et ferroviaire ont été utilisées. Cette base est d'origine IGN©, et sert d'entrée pour tous les scénarios.

6.3.1 Modélisation de la logistique actuelle

Nous notons à ce stade que seuls les protocoles de l'Internet Physique ont été présentés lors du chapitre 5. Il est ainsi nécessaire de définir une modélisation des pratiques actuelles et qui sont simulées via le scénario de référence. La détermination de la route n'ayant pas de sens dans ce scénario car les expéditions sont directes vers les destinations, il faut néanmoins définir le traitement des commandes (qui remplace celle de la conteneurisation dans Internet Physique) et le transport (expéditions de camions).

6.3.1.1 Traitement des commandes

Comme pour les scénarios de l'Internet Physique, le modèle lit les commandes dont la date d'expédition prévue est à échéance. Lors de cette lecture, on crée des expéditions en regroupant l'ensemble des lignes de commandes (chaque ligne de commande correspondant à un produit) qui ont la même destination pour la même date d'expédition prévue. Ce travail est effectué par l'agent Traitement des commandes et Conteneurisation dans le simulateur.

Intervient alors le protocole de transport pour créer les expéditions adaptées à la taille des semi-remorques.

6.3.1.2 Le Transport

Chaque expédition ainsi créée est insérée dans un ou plusieurs camions (car c'est le seul moyen considéré pour le scénario de référence) via la création de plans de chargements.

Ces plans de chargements comportent une liste de lignes de commandes et respectent les capacités d'un camion en surface au sol (33 palettes) et en poids (25 tonnes). La création des plans de chargements se fait via l'algorithme suivant à partir des différentes expéditions déjà créées:

- Création d'un plan de chargement vide (qui correspond à un chargement de camion)
- Pour chaque ligne de commande de cette expédition, l'insérer dans le plan de chargement tant que le volume et le poids maximum du moyen sont respectés.
- Si la ligne de commande ne peut pas être insérée dans le plan de chargement car manque d'espace ou de poids disponible, on divise cette ligne de commande en une première ayant comme quantité la capacité restante du camion (en poids ou en volume, par prépondérance), et une seconde pour laquelle on créera un nouveau plan de

chargement vide et l'y insérera. On y insère aussi le reste des lignes de commandes de la commande en traitement.

Le raisonnement se fait ainsi en boucle jusqu'à ce que l'ensemble des expéditions soit traité.

Le résultat est donc un ensemble de plans de chargements qui seront convertis en camions chargés et dont le chargement respecte bien le nombre maximal de palettes transportables en termes de volume en surface (2.4*2.4*13.2 m) et de poids (25 tonnes).

L'algorithme permet ensuite d'expédier les camions chargés vers la destination suivant le chemin le plus rapide. Enfin, la simulation calcule un temps d'arrivée prévu à partir de la base de données d'infrastructure qui associe à chaque lien (route et rail) le temps de trajet.

Il est à noter que les temps de tris, et de chargement des palettes sont fixés à 40 mn. Enfin, à l'arrivée des camions à leurs destinations, les palettes seront déchargées et ne seront plus considérées comme existantes dans la simulation, l'acheminement de la marchandise étant accompli (Les temps de déchargements sont fixés à 20 minutes). L'ensemble de ces processus sont implémentés dans l'agent Transport du simulateur.

6.3.2 Données de l'infrastructure actuelle

Concernant l'infrastructure routière, les données proviennent de la base Route 120® de l'Institut Géographique National (IGN). Les sites (usines, etc.) sont repérés par leur position réelle et liés par des routes, autoroutes et voies ferrées (cf. Figure 56).

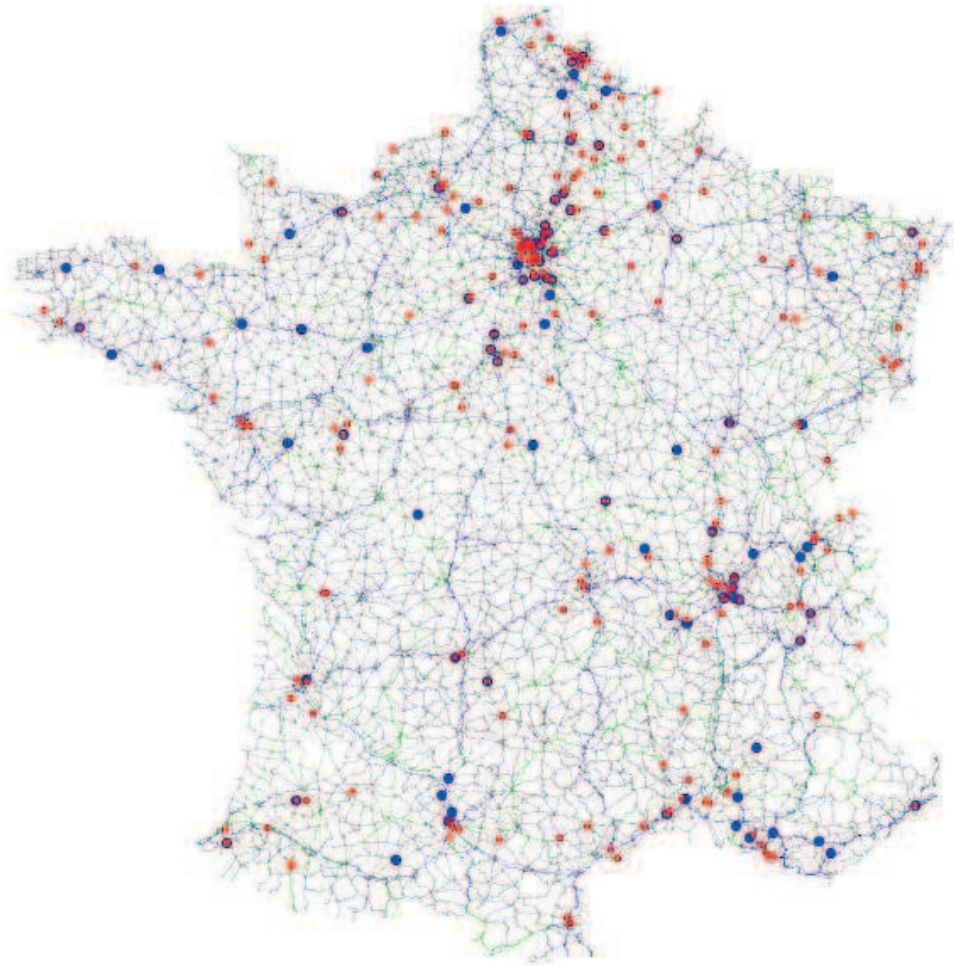


Figure 56: Réseau des usines, entrepôts et centres de distribution reliés par les schémas logistiques routiers

Au niveau de l'infrastructure ferroviaire, la base de données géographique Route 120® contient également l'ensemble des gares y compris de marchandises et les voies ferrées. Cependant à la différence de la route on ne peut pas considérer dans la situation actuelle du réseau ferroviaire que toutes les gares de marchandises sont accessibles par des services réguliers et *a fortiori* à des flux multimodaux.

En conséquence, il a été fait l'hypothèse de restreindre le réseau aux gares multimodales exploitées et à quelques sites majeurs embranchés. La liste exacte des sites et des lignes est donnée dans l'annexe 1. Ces sites étant en nombre restreint, il a été donné la possibilité de tous les utiliser dans les scénarios faisant usage du ferroviaire.

La Figure 57, montre les principaux sites filtrés dans la base IGN parmi l'ensemble des gares de marchandises répertoriées.

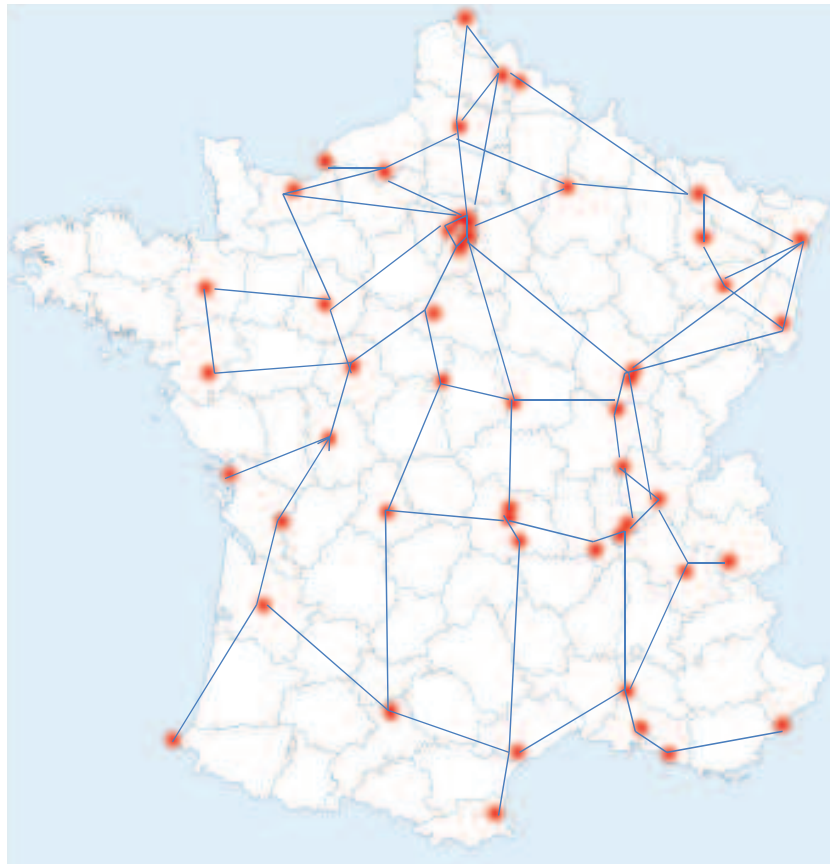


Figure 57: Sites multimodaux pris en compte dans les scénarios utilisant le réseau ferroviaire par filtrage de la base de l'IGN

L'utilisation de ces bases d'infrastructures assure la précision des distances à parcourir entre chaque paire de sites, ainsi que les temps de parcours suivant l'infrastructure utilisée : route secondaire, autoroute, voie ferrée, etc.

Pour plus de précision sur ces bases de données, le lecteur pourra consulter (Ballot et al. 2012b).

6.4 L'Internet Physique : Réseaux et protocoles

Les protocoles de l'Internet Physique ont déjà été développés dans le chapitre 5, inutile donc d'y revenir. On se concentrera donc sur la troisième source de données de notre modèle de simulation, qui concerne la représentation des réseaux de prestations de l'Internet Physique.

Pour les scénarios de l'Internet Physique, que l'on présentera dans le paragraphe 6.5, nous avons défini deux catégories : une première qui respecte la structure de la chaîne d'approvisionnement actuelle (usines -> entrepôts -> Centre de distribution), et une seconde

qui changera cette structure en éliminant le point de passage des flux par l'entrepôt. Dans cette seconde catégorie la notion d'entrepôt n'existerait plus.

Pour la simulation de ces deux catégories de scénarios, nous avons besoin de deux types de réseaux PI. Un réseau Internet Physique correspondant à la création et au positionnement d'un certain nombre de hubs dans le territoire et aux liaisons entre eux et avec des sites logistiques. Le premier réseau PI vient interconnecter des hubs avec l'ensemble des sites d'approvisionnement actuels dont on dispose dans notre base de données. Ce réseau servira pour la première catégorie de scénarios. Le deuxième réseau PI crée une interconnexion uniquement entre les usines, les centres de distributions via des hubs, éliminant de fait les entrepôts. Ces livraisons directes, aussi appelées « direct-usine » se justifient par la capacité du réseau de traiter de faibles envois. Le direct usine est aujourd'hui réservé aux industriels les plus importants et près de 50% des flux simulés se démocratiserait ainsi.

Ainsi, le réseau PI peut être soit l'un soit l'autre en fonction des scénarios à simuler.

La construction du réseau Internet Physique a été réalisée par l'EPFL-Lausanne (Ballot et al. 2012a, Ballot et al. 2012b), notre partenaire dans ce projet. Globalement, il s'agissait de trouver une méthode pour passer de la carte de gauche à la carte de droite dans la Figure 58.

Afin de simuler le transport des flux à travers un réseau raisonnable, nous avons utilisé un réseau optimisé avec les mêmes données d'infrastructure et de flux que la simulation. Cette optimisation, un problème très complexe, a été résolue avec une approche méta-heuristique qui construit la solution pas à pas et qui cherche à minimiser une fonction-objectif. La fonction objectif qui a été retenue ici est une fonction énergétique. Ce choix permet de s'affranchir des variations intempestives des prix et par ailleurs tend vers une solution environnementale. Cette fonction pourrait être remplacée par une fonction économique classique incorporant les coûts variables directs ou en valorisant l'énergie et intégrant les investissements.

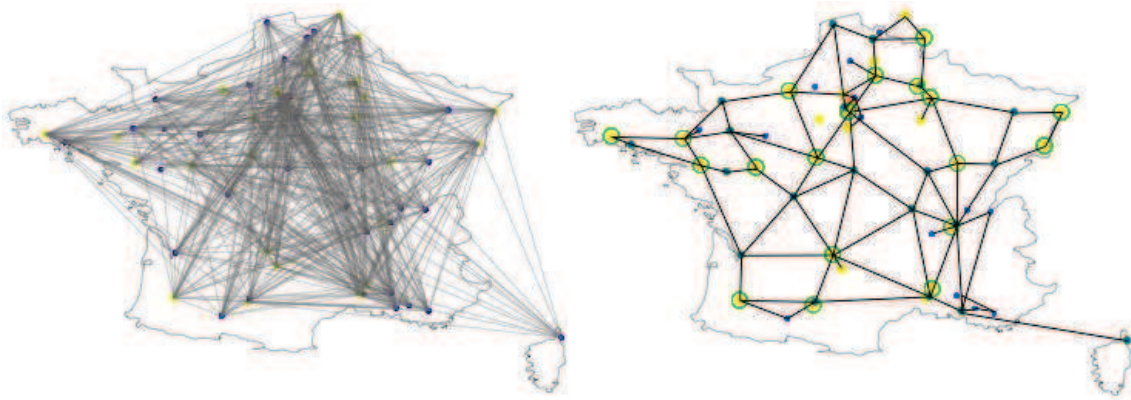


Figure 58: Exemple de passage d'un réseau de prestations dédiées (à gauche) à un réseau interconnecté (à droite)

Pour trouver la solution, la méthodologie employée consiste de partir d'une solution de départ dont la configuration est peu déterminante (un ensemble de hubs placés à des nœuds du réseau d'infrastructure) puis de faire évoluer cette solution vers une autre. L'optimisation se fait par amélioration de la configuration réseau obtenue par succession de phases d'exploitation et d'exploration :

- L'exploitation consiste à tenter d'améliorer la configuration en cours par ajustement des localisations et des allocations des flux aux hubs
- l'exploration est utilisée pour casser la configuration réseau afin d'en découvrir de nouvelles et de sortir des optima locaux par suppression des hubs les moins utilisés et dédoublement des plus utilisés.

Afin de garantir une certaine convergence, les phases d'exploitation sont plus présentes que celles d'exploration, cela afin de plus souvent optimiser la solution que de la casser.

Pour plus de renseignement sur la méthodologie appliquée et sur le processus d'optimisation, la localisation et la détermination des hubs voir (Ballot et al. 2012b).

Nous présentons maintenant les deux réseaux PI qui ont été construits.

6.4.1 Réseau Internet Physique – usines / entrepôts / DC

Ce réseau est optimisé pour créer un maillage entre tous les sites (usines, entrepôts et centres de distribution). Ce réseau comporte 47 hubs dont 17 avec une liaison ferroviaire. Le réseau peut être utilisé avec ou sans le réseau ferroviaire pour avoir une base de comparaison sachant que toutes les liaisons ferroviaires sont doublées par la route.

Sur la Figure 59 les lignes ferroviaires sont représentées par des droites noires pour les distinguer des routes et des hubs en jaune. Les usines ou les entrepôts sont en rouge et les centres de distribution sont en bleu.

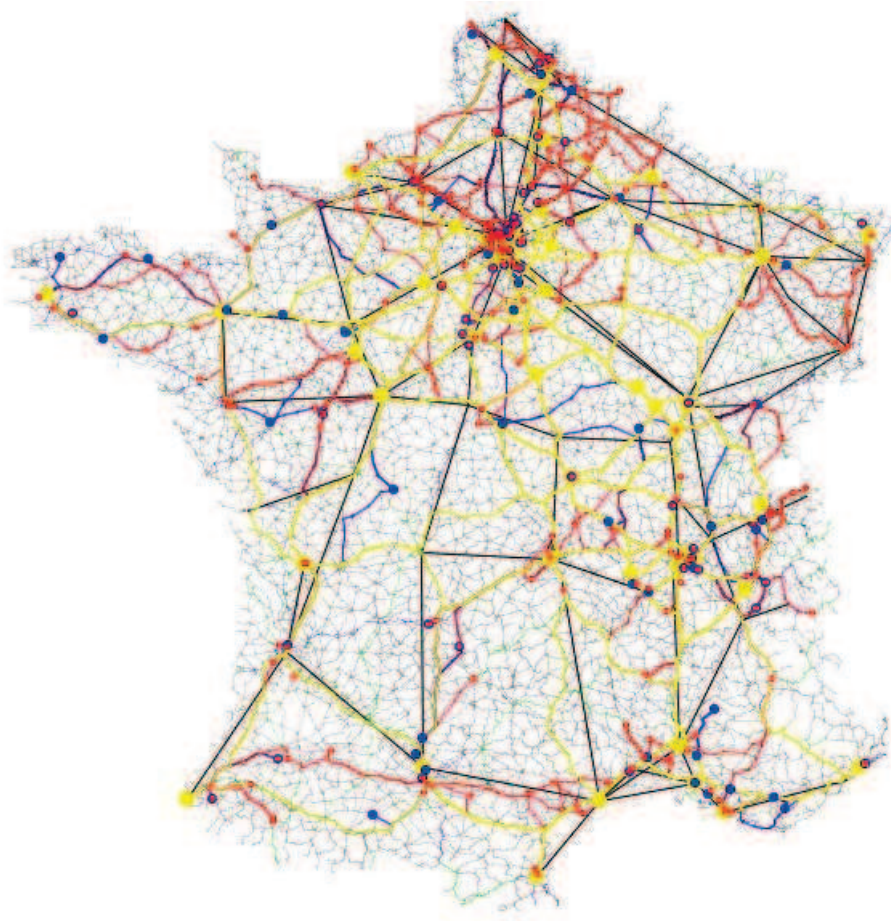


Figure 59: Réseau de schémas logistiques de l'Internet Physique reliant l'ensemble des sites

6.4.2 Réseau Internet Physique liant directement les usines aux centres de distribution

Ce réseau est optimisé pour créer un maillage entre tous les sites de production et les centres de distribution. Il repose sur le test de l'hypothèse que l'Internet Physique permet de se passer des entrepôts car de faibles quantités peuvent être expédiées directement des usines sans causer de surcoût. Ce réseau comporte 35 hubs dont 19 avec une liaison ferroviaire (Figure 60). De la même manière, le réseau peut être utilisé avec ou sans le réseau ferroviaire et toutes les liaisons ferroviaires sont aussi doublées par la route.

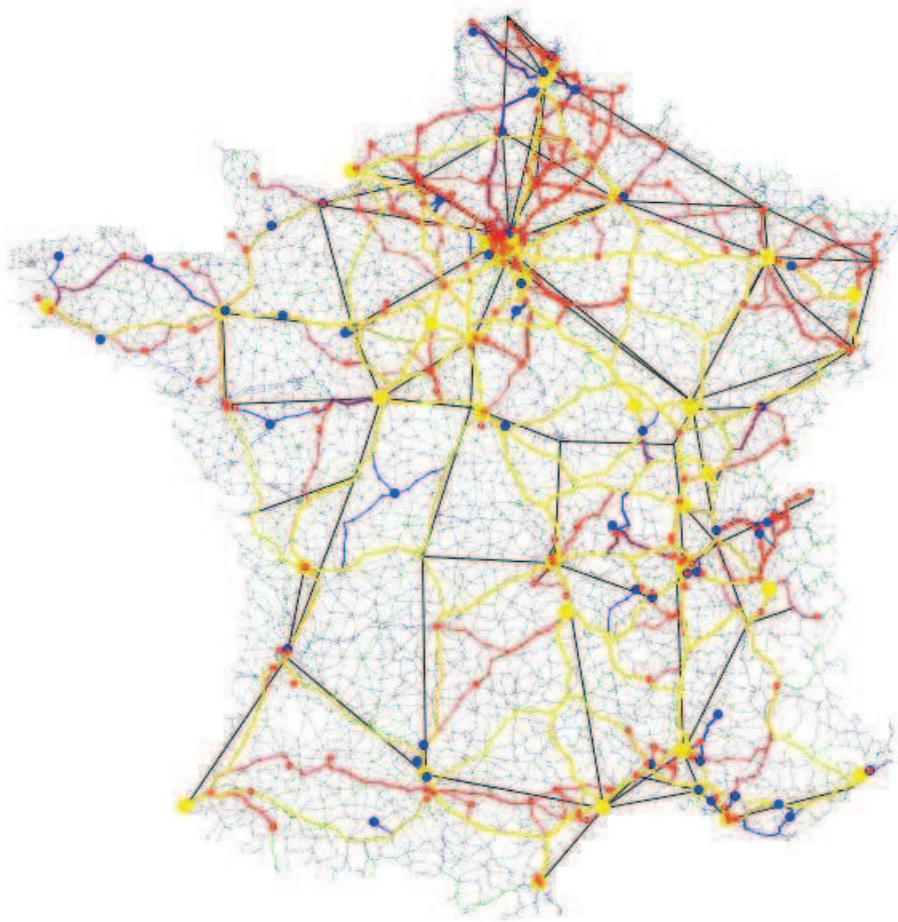


Figure 60: Réseau de schémas logistiques de l'Internet Physique reliant directement les usines aux centres de distribution

Il faut en outre rappeler ici que les réseaux décrits représentent des schémas logistiques et non un trafic sur l'infrastructure. Pour illustrer la différence, la Figure 61 donne un exemple de trafic généré avec une épaisseur proportionnelle aux volumes.



Figure 61: Un exemple de trafic généré sur l'infrastructure par le réseau PI

6.5 Evaluation des performances de l'interconnexion des réseaux logistiques

Dans ce paragraphe nous présentons et définissons les indices de performances (KPI) que l'on a choisi comme référence pour évaluer les différents scénarios simulés. Ensuite, nous présentons l'ensemble des scénarios simulés, pour enfin analyser les résultats obtenus.

6.5.1 Indices de performances mesurées

Afin d'évaluer les performances potentielles de PI, il est nécessaire de définir un certain nombre d'indicateurs qui permettront ensuite de faire une analyse sur les avantages de cette nouvelle solution logistique par opposition au système actuel.

L'évaluation porte sur les 3 axes du développement durable, optant ainsi pour des indicateurs de performances économiques, environnementaux et/ou sociétaux. Les principaux indicateurs

sont : coût de transport, coût de transit, énergie consommée, émission de CO₂, nombre de hubs traversés pour atteindre la destination, kilomètres parcourus, effort de transport (tonne*kilomètre), part de report modal, nombre de segments de transport empêchant un retour au domicile du chauffeur dans son service, délai de livraison, taux de remplissage des moyens,...

Au final une vingtaine de composantes ont été retenues, et sont recensées dans le Tableau 18. Dans l'annexe 2, le lecteur pourra consulter les définitions de ces indicateurs de performances, ainsi que les valeurs de références utilisées.

Tableau 18: Liste des indicateurs de performance retenus

No.	Indicateur	Eco.	Env.	Soc.	Unité
1	Coût logistique global	X			€
2.a	Temps en stock par type conteneur	X			jour
2.b	Nombre d'entrées & sorties pour stock par type conteneur	X			#
2.c	Nombre de manutention par type conteneur	X		X	#
3	Nombre d'échange de remorque (camion)	X		X	#
4	Energie consommée (camion et train)	X	X		L / kWh
5	Emissions CO ₂ (camion et train)	(Taxe)	X		kg
6	Nombre de hubs actifs	X	X	X	€/€
7	Nombre de segment dans les trajets des conteneurs	X		X	#
8	Kilomètres parcourus (route et rail)	X	X		km
9	Nombre de pauses et de nuitées (route)	X		X	#
10.a	Transport (route et rail)	X	X		tonne*km
10.b	Part du report modal	X	X	X	%
11	Délai de livraison (par conteneur)	X		X	heure
12.a	Taux de chargement (poids et volume) des moyens de transport (camion et train) en marchandises	X	X		%
12.b	Taux de remplissage (volume) des conteneur	X	X		%
12.c	Taux de chargement (poids et volume) des moyens de transport (camion et train) en conteneurs	X	X		%
13	Temps de passage par hub par conteneur	X			heure
14	Taux de conteneurs sans retard	X		X	%
15	Nombre de trajets réalisés (route et rail)	X	X	X	#
16	Somme des poids transportés (route et rail)	X	X		tonne
17	Somme des volumes transportés (route et rail)	X	X		m ³
18	Liens actifs (route et rail)	X			#
19	Nombre de conteneurs utilisés par type	X			#

Notons que le temps de conduite et de repos des conducteurs sont tirés de la réglementation française. Les données financières telles que la manutention des palettes dans un entrepôt, les prix de la mobilisation des camions etc. sont des données de marché et pourront être actualisées si nécessaire.

6.5.2 Les scénarios simulés

Pour démontrer le potentiel de l'Internet Physique, plusieurs scénarios ont été établis. L'objectif est de montrer que ces scénarios représentent différents niveaux du déploiement de l'Internet Physique et qu'à chacun de ces niveaux correspond un enjeu progressif. Trois familles de scénarios sont présentées ici et chaque famille contiendra des sous-scénarios, représentant différentes variantes, comme indiqué dans le Tableau 20. Pour simplifier, quand on parle de scénario 1, par exemple, il faudra comprendre la famille du scénario 1.

Le Tableau 19 résume les quatre familles de scénarios.

Tableau 19: Présentation des scénarios

Familles de scénarios	0	1	2	3
Flux	Actuel	Actuel	Actuel	Sans entrepôts
Réseaux	Actuel	Internet Physique	Internet Physique	Internet Physique
Train	Non	Non	Oui	Oui

6.5.2.1 Scénario 0 : la simulation du réseau logistique actuel

Le Scénario 0 sert à simuler les pratiques logistiques actuelles, il s'agit du scénario de référence. Sur la base des données que nous avons, seuls les flux Usines-Entrepôts-DC (Centre de distribution) et Usines-DC sont étudiés. Les flux sont transportés de nœud à nœud via uniquement des camions, comme le montre la Figure 62. Grâce au simulateur, nous sommes en mesure d'évaluer la performance du transport dans les pratiques logistiques actuelles, ce qui permettra non seulement de comparer les résultats obtenus avec ceux de la littérature mais aussi de les comparer avec les scénarios de l'Internet physique. Ce scénario

repose sur des transports en trace directe (pas de tournées) et par camion dédié (Full Truck Load). Ce transport en camion complet est plus avantageux que le transport par lot ou messagerie dans le cas des flux de la base de données.

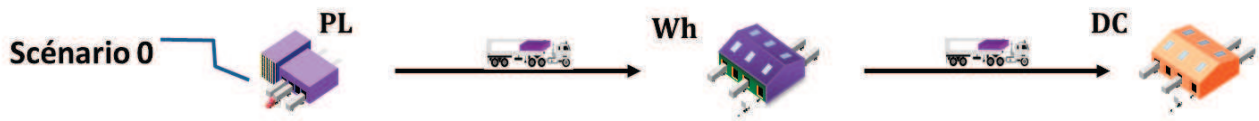


Figure 62: Modèle de Supply Chain Actuel

6.5.2.2 Scénario 1: le réseau Internet physique avec uniquement le transport routier

Dans le scénario 1, on garde la même structure de la chaîne d'approvisionnement actuelle (comme dans le scénario 0), par contre le transport (routier seulement) sera effectué au sein du réseau Internet physique, comme illustré à la Figure 63. Une autre différence est que dans ce scénario, les marchandises sont encapsulées dans PI-conteneurs, ce qui est fait via le protocole de la conteneurisation. En d'autres termes, nous ne transportons pas des palettes / cartons, mais des PI-conteneurs qui voyageront dans le réseau PI. L'impact sur la chaîne d'approvisionnement est représenté dans la Figure 63, en comparaison avec la Figure 62, représentant le modèle actuel de la chaîne d'approvisionnement.



Figure 63: Scénario1: Internet Physique avec uniquement le transport routier

L'objectif de ce scénario est de démontrer le potentiel du réseau Internet physique sans changer la structure de l'offre actuelle de la chaîne. Ce scénario a été testé avec les 4 séries de conteneurs définis dans le Tableau 16, et avec différents critères de routage à savoir le temps et le coût. Les émissions n'ont pas été retenues dans ce scénario comme critère pour le routage puisque nous n'avons qu'un seul mode de transport.

6.5.2.3 Scénario 2: Le réseau Internet Physique multimodal

Le scénario 2 étudie la performance du réseau Internet physique présentée dans le scénario 1 avec cette fois-ci la possibilité d'un transport multimodal alternatif à la route, en particulier pour réduire les délais ou les émissions de CO₂. En France, le train électrique peut réellement

être très utile pour réduire les émissions de CO₂ des transports grâce à l'énergie nucléaire. Mais sans un Internet physique, ce moyen est quasiment écarté du secteur de la grande distribution car les entreprises ne peuvent généralement pas expédier un train de 26 wagons (taille standard d'un train en France, soit plus de 1000 tonnes de marchandise) vers une seule destination. Autrement, le réseau Internet Physique permet de consolider les flux de différents expéditeurs et donc de passer au service ferroviaire par train complet sur des liaisons point à point. En outre, la conteneurisation des marchandises a un autre avantage en faveur du transport multimodal, elle facilite les opérations de transfert. Par conséquent, dans ce scénario (cf. Figure 64), nous souhaitons démontrer la contribution potentielle du transport ferroviaire associé au concept de l'Internet Physique, sur la réduction des émissions en CO₂.

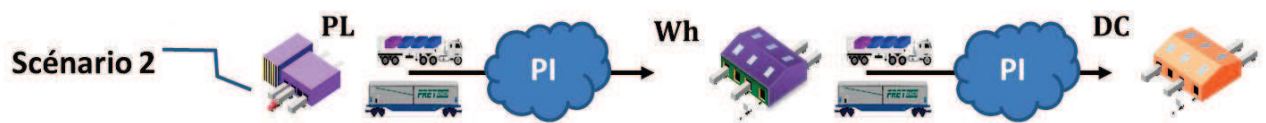


Figure 64 : Scenarios 2: l'Internet physique avec le transport multi-modal (rail et route)

La Figure 65 représente les flux simulés pour ce scénario avec les lignes en vert qui représentent les flux entre les différents nœuds du réseau.

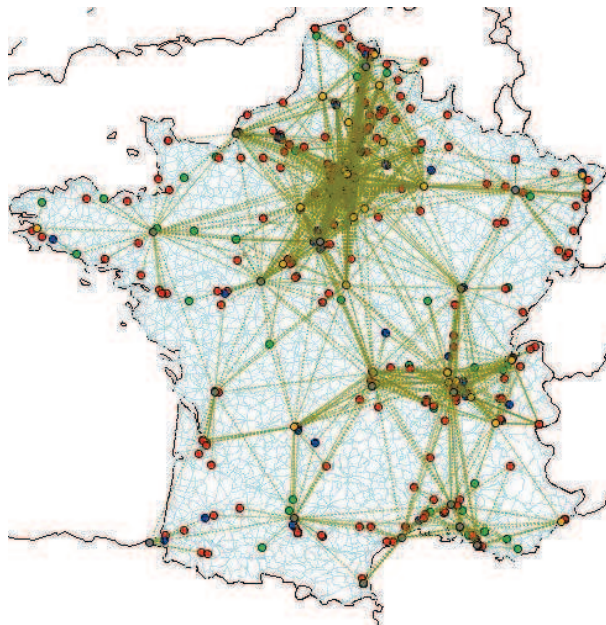


Figure 65: Réseaux interconnectés, sc. 2.3.C - Vision du flux

Cette famille de scénarios, comme pour les scénarios 1, permet de contraster les critères de routage entre le coût, le temps et les émissions.

6.5.2.4 Scénario 3 : Le Réseau Internet Physique sans entrepôt

Une idée de l'Internet physique serait de se dispenser des entrepôts traditionnels car elle permet une mobilité qui supprime les besoins en stockage centralisé. Pour aller vers cette idée, nous simulons l'expédition directe depuis les usines jusqu'aux centres de distribution en poussant les centres de distribution à passer leurs commandes directement aux usines en lieu et place des entrepôts (Figure 66). Il s'agit d'une généralisation d'une pratique courante pour les plus grands producteurs vu qu'ils ont assez de volume pour expédier directement à chaque centre de distribution. Comme dans le scénario 2, nous utilisons le transport multimodal dans ce scénario.



Figure 66: Scénario 3: Flux directs entre usines et centres de distributions dans PI

Ce scénario propose un nouveau compromis entre d'une part la réduction des taux de remplissage des moyens de transport, car moins optimisés que depuis les usines, et d'autre part la réduction de l'ensemble des temps de transports, la réduction des stocks et des coûts d'exploitation des sites en raison de l'élimination du stockage dans les entrepôts et les livraisons directes des centres de distributions depuis les usines.

6.5.3 Résultats obtenus

Nous allons montrer ici les résultats obtenus et discuter de leur intérêt. Mais en premier lieu il faut indiquer comment le scénario actuel, dit de référence, a été validé et les alternatives construites.

6.5.3.1 Validation du modèle

Comme mentionnées précédemment, les données utilisées pour cette simulation proviennent de deux chaînes logistiques de deux distributeurs nationaux et sont collectées dans le cadre d'un groupe de travail du Club Déméter pour la Logistique. La validation des données avait été menée dans le cadre de ce groupe de travail en préalable aux travaux de recherche sur la mutualisation dans la grande distribution (Pan 2010).

Le scénario 0 a été construit pour deux raisons: valider le modèle de simulation d'une part et avoir une référence de comparaison d'autre part. Les critères de validation furent ceux de la caractérisation des flux tels que présentés dans le Tableau 17 ainsi que des indicateurs de performance, au premier rang desquels le taux du remplissage des moyens routiers. En effet, cet indicateur représente la performance transport de la simulation dans le scénario de référence puis les suivants.

Nous retrouvons notamment un taux de chargement de 59% en poids et de 45% en volume. A titre de comparaison dans l'étude de référence sur la chaîne logistique alimentaire McKinnon (McKinnon 2000, McKinnon et al. 2003) trouvait 53% de taux de chargement en poids et 69% en surface sol. Le taux d'occupation en volume ne peut pas servir de moyen de comparaison car il n'est pas suivi par les statistiques officielles et n'avait pas été mesuré dans l'étude citée précédemment. Cependant on peut avoir un ordre de grandeur en faisant quelques approximations. En effet, si nous considérons que l'ensemble des palettes dans les camions sont pleines à 100% et qu'elles mesurent donc $(1.2*0.8*1.8^{11} \text{ m})$, avoir un taux de chargement de 100% en surface au sol reviendrait à avoir un taux de $33*(1.2*0.8*1.8)/(13.2*2.4*2.4) = 75 \%$ de remplissage en volume ($75\% = 33*\text{volume d'1 palette complète/capacité en volume d'1 camion}$). Il faut noter que ce taux de 75% est une borne supérieure car on a pris l'hypothèse que les palettes sont toujours chargées au maximum en volume. Ainsi, une moyenne de remplissage en surface de 69%, équivaudrait à un remplissage en volume de $69\%*75\% = 51.75\%$. Cette valeur est supérieure aux 45% trouvée par la simulation. La différence s'explique par la présence importante de flux liquides avec une densité moyenne de 0.4, alors que la densité moyenne des liquides est de 0.7 et celle de l'épicerie de 0.2 (McKinnon 2010). Ce qui explique donc l'espace plus faible utilisés par ces produits.

D'autre part, si l'on se réfère aux données européennes, on constate que la charge moyenne est de l'ordre de 50% en poids pour le transport en semi-remorque en France (EuroStat 2007) avec quelques variations années après années (McKinnon 2010). L'ensemble de ces comparaisons associées aux jugements des participants du groupe de travail permet donc de valider notre modèle.

¹¹ 1,8m de hauteur correspond à la limitation actuelle de hauteur pour manutention

6.5.3.2 Résultats des simulations et analyses

Les scénarios qui ont été simulés montrent une implémentation progressive du concept de l'Internet physique. Nous présentons dans cette partie les avantages que pourraient apporter ces nouveaux concepts de la logistique d'une manière progressive selon les scénarios. Les résultats sont sous la forme de plusieurs indicateurs économiques environnementaux et sociétaux.

De nombreuses variantes peuvent être testées dans les trois scénarios de simulation: jeu de tailles de conteneurs, objectifs de routage, la charge minimale pour un départ immédiat, le temps d'attente maximum, la structure du coût de manutention, etc. Après avoir testé de nombreuses combinaisons de variations, les résultats présentés ici sont les résultats d'ajustements de ces paramètres. Par exemple, nous avons constaté qu'un temps d'attente maximum, pour les conteneurs, de 12 heures par rapport à 3 heures n'a pas vraiment amélioré le taux de remplissage mais par contre altère les délais. Les résultats suivants sont basés sur 3 heures de temps d'attente maximum à chaque PI-hub et 90% de charge minimale pour un départ immédiat. Il permet le départ d'un camion semi-remorque européen avec 12m de conteneur(s) sur une remorque de 13.2 m. Voir le Tableau 20 pour une vue d'ensemble des principaux KPI pour chaque scénario. Concernant la notation des scénarios, le 1.2.C par exemple, se référera à la famille de scénario 1, utilisant le jeu de conteneurs 2 (voir Figure 16) et ayant comme critère de routage la minimisation des coûts.

Dans l'annexe 2, le lecteur pourra consulter les valeurs de références utilisées pour l'évaluation de ces indicateurs, ainsi qu'un exemple de résultats obtenus dans l'annexe 3.

Tableau 20: KPIs des scenarios simulés

Famille de sc.	Sc.	Jeux de Cont.	Crit. de routage	Moy. Des Taux de rempliss. poids	Moy. Nombre Hubs visités	Moy. Délais de livraison(h)	CO ₂ (t)	Coûts Logistiques ¹² (k€)
0	NA	NA	NA	59%	0	5.86	52 742	111 245
1	1.1.C	1	Coût	62%	2.24	5.4	53 107	106 948
1	1.2.C	2	Coût	76%	2.20	10.02	45 545	133 537
1	1.3.C	3	Coût	75%	1.93	8.69	46 682	97 698
1	1.3.T	3	Temps	76%	2.25	8.89	45 599	98 130
1	1.4.C	4	Coût	71%	2.23	11.05	47 699	101 578
2	2.3.C	3	Coût	72%	2.28	8.73	29 878	91 994
2	2.3.T	3	Temps	70%	1.66	8.45	33 035	93 860
2	2.3.E	3	CO ₂	72%	2.94	9.88	23 600	94 989
3	3.3.E	3	CO ₂	67%	2.95	11.84	22 120	75 885
3	3.3.C	3	Coût	65%	2.30	10.69	27 584	74 218

Pour chaque indicateur présenté dans cette section, les variations des trois scénarios sont présentées en même temps que le scénario de référence (scénario 0).

6.5.3.2.1 Indicateurs économiques

Le descriptif du calcul des indicateurs est donné en annexe.

6.5.3.2.1.1 Utilisation des conteneurs

La distribution des conteneurs utilisés dans le modèle montre un tropisme vers les plus grands conteneurs. Ceci est un biais des opérations actuelles et cela démontre que les commandes ciblent la taille de la remorque. Ce résultat correspond à l'approche actuelle axée sur la pleine

¹² Comprend : coûts d'énergies (gasoil), transport (camion, train), manutentions (conteneurs, palettes), transit, entré/sortie des stocks, stockage, location conteneurs.

charge des transports dédiés, et contribue a priori à minimiser les coûts de transport. En effet, dans tous les cas, sauf pour le scénario 1.2, qui impose des PI-conteneurs de 1,2 m de long, on note une domination de l'utilisation des plus grands PI-conteneurs. Cependant, comme nous le monterons d'autres indicateurs, la limitation à des conteneurs de 12m (ou à 3 et 6 m) réduit les performances tel que le taux de remplissage. Notons que le scénario 1.2, avec de petits PI-conteneurs, est une variante qui encourage la réduction de la taille des expéditions, ce qui implique une augmentation des taux de remplissage, de la fréquence d'expéditions et une réduction des besoins de stockage.

Une limitation de cette recherche vient du fait que nous considérons ici les commandes réelles, qui tentent de saturer les moyens en particulier en amont entre les usines et les entrepôts où le camion complet est la règle. Il n'est donc pas surprenant que l'on trouve dans le scénario 3 une proportion plus équilibrée entre les tailles de conteneurs. Ceci s'explique par le fait que les commandes effectuées par les centres de distribution à partir des usines ou des entrepôts ont plus de difficultés à générer des chargements complets. Dans ce cadre, nous avons aussi testé une variante avec seulement de petits contenants (comme le scénario 1.2).

On peut facilement imaginer que l'Internet Physique sera un réel encouragement pour réduire la taille des expéditions, c'est pourquoi il convient de tester la viabilité de conteneurs de quelques m³ seulement.

La Figure 67 représente l'utilisation des conteneurs selon la taille dans chaque scénario.

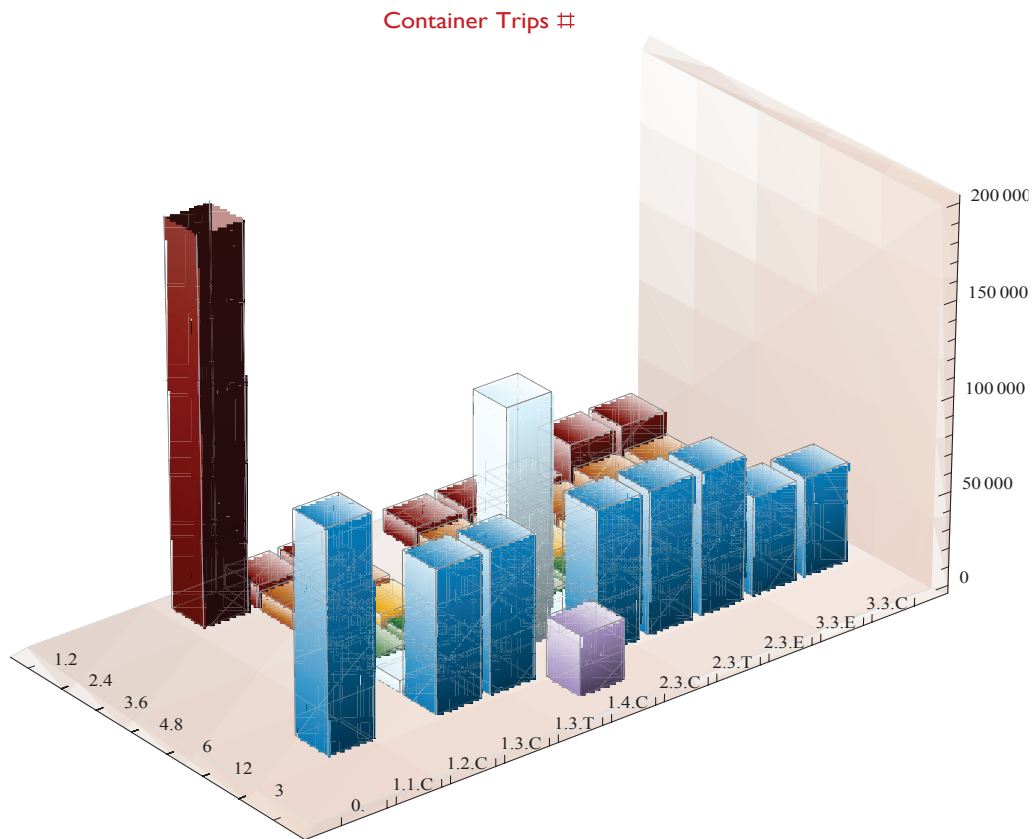


Figure 67: Conteneurs créés par taille entre les scénarios – Hors échelle : Sc 1.1 avec 117 585 conteneurs de 12m delongueur, Sc1.2 avec 677 551 conteneurs de 1.2 m de longueur.

6.5.3.2.1.2 Remplissage des moyens de transport

Ce taux est disponible en poids, mais aussi en volume, car il est possible d'atteindre la saturation avec l'un ou l'autre de ces deux critères en fonction des produits chargés, notamment les liquides. Nous présentons, dans la Figure 68, les résultats des taux de remplissage en poids.

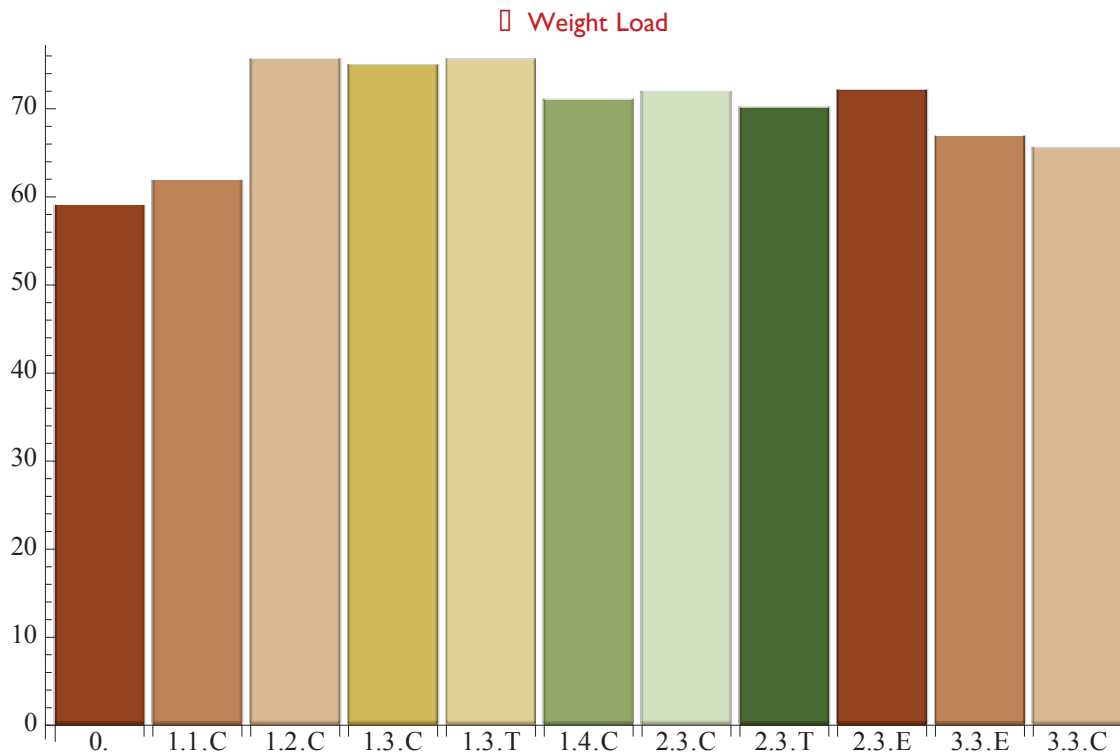


Figure 68: Taux de remplissage moyen en poids par scénario

Les résultats de la Figure 68, montrent que le passage à l'Internet Physique dans le cadre étudié permet un gain très significatif. En effet, l'utilisation de la capacité de charge des moyens de transport passerait de 59% (actuellement) à des taux se situant entre 65% et 76% en poids, et une tendance similaire en volume. Les résultats en volume sont moins impressionnants en raison de la densité relativement lourde des produits utilisés ici, dont la plupart sont des liquides (boissons et DPH).

Nous notons que dans le scénario 1 le taux de remplissage en poids augmente de 17% par rapport au scénario actuel. Cela est dû à la consolidation des flux dans le réseau Internet Physique. Les meilleurs gains sont obtenus avec le scénario 1.2 qui utilise uniquement les petits PI-conteneurs, en fournissant le maximum de liberté de chargement dans des véhicules. A contrario, dans la famille des scénarios 1, le scénario 1.1 est le moins bon en termes de remplissage vu la taille de ses conteneurs (12 m) qui est moins adaptés aux expéditions de petits volumes. On constate donc qu'utiliser uniquement les conteneurs de 40 pieds actuels, même le « palletwide », n'apporte pas un gain significatif et explique en partie la difficulté de développement de ce type de solution. D'autre part, le scénario 1.3.C a un meilleur taux de remplissage que celui du scénario 1.4.C, ce qui est justifié par le plus large choix en tailles de

conteneurs dans le premier scénario. La conception des tailles et jeux de conteneurs, est ainsi un point important pour la conception de l'Internet Physique.

Le gain est plus faible dans le scénario 2, car nous divisons les flux entre deux parties: une partie qui utilisera le transport routier et une autre le transport ferroviaire, les wagons étant plus difficiles à remplir en raison de leur grande taille et de leur acceptation de charges plus importantes par wagon. Cette division du flux réduit les possibilités de consolidation. Encore une fois, le fait que nous considérons dans notre modèle uniquement deux grands distributeurs, réduit le potentiel de consolidation des flux mais montre un démarrage possible à échelle « réduite ».

Le scénario 3 a une plus faible performance en termes de taux de remplissage que les scénarios 1 et 2, mais il reste meilleur que le scénario 0 d'environ 6%. Ce manque de performance est dû à l'absence d'entrepôts permettant la consolidation des flux grâce à l'exploitation des stocks importants. De plus, dans le scénario 3, les taux de remplissage des camions diminuent car il n'y a quasiment pas de camions pleins entre les usines et les centres de distributions.

De même, Internet Physique permet une meilleure performance en termes de remplissage (Figure 69) en volume et on pourrait faire la même analyse que celle qui est faite pour le remplissage en poids concernant les résultats obtenus. Il est important de noter que le taux d'utilisation en volume est un taux qui inclut à la fois la perte de remplissage éventuelle des conteneurs et la perte de chargement du moyen. Ainsi un camion avec la moitié de la remorque couverte de conteneur eux-mêmes à moitiés remplis aurait un taux d'utilisation de 25% et non de 50%. Par ailleurs il faut rappeler ici que le gain supplémentaire de 10% possible en volume et non comptabilisé, car lié au passage des cartons aux sous-conteneurs modulaires démontré par Meller (Meller et al. 2012), n'est pas pris en compte ici.

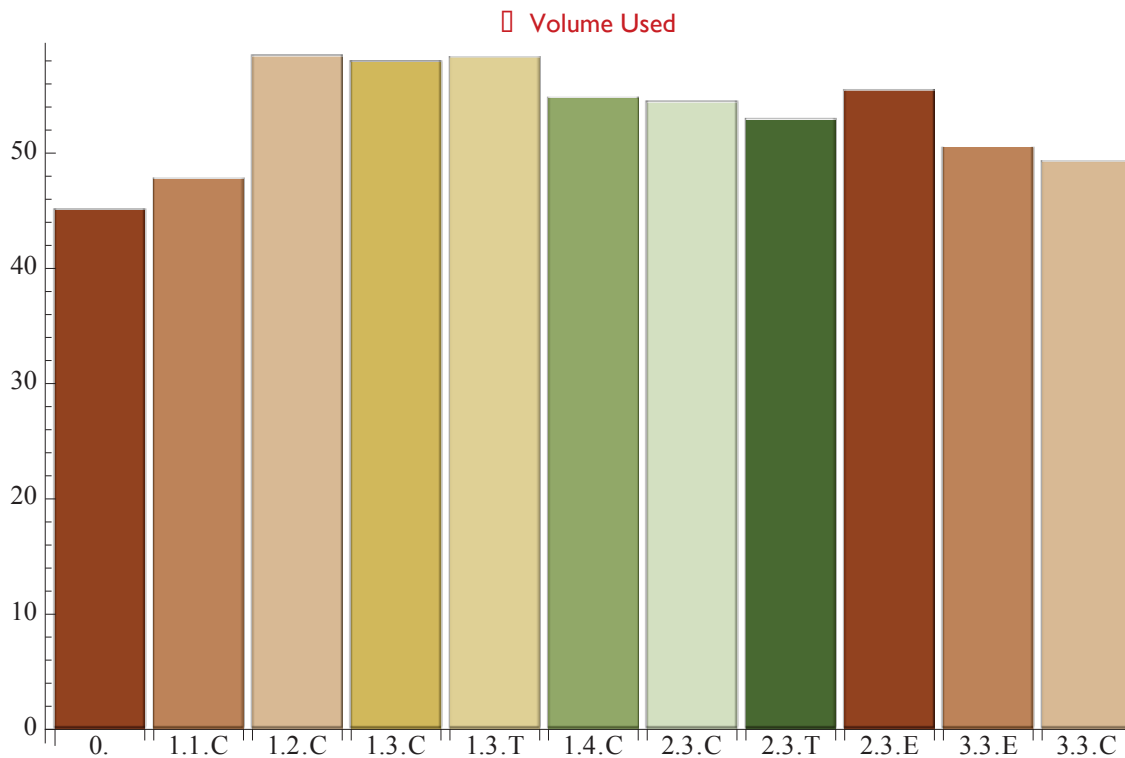


Figure 69: Taux d'utilisation en volume des moyens de transport par variante des scénarios

Globalement, les résultats obtenus montrent une progression significative (jusqu'à 17% pour le remplissage en poids) du taux de remplissage, ce qui représente un gain important, et ce en dépit de plusieurs facteurs défavorables: des chaînes d'approvisionnement déjà performantes, des commandes non ajustées à la taille des conteneurs, l'utilisation de moyens lourds plus difficiles à pourvoir dans les scénarios 2 et 3, des flux plus faibles lorsque nous n'utilisons pas d'entrepôts dans le scénario 3. D'autre part, on voit que la limitation à des conteneurs de 12m dans le scénario 1.1.C, et à 3 et 6 m dans le scénario 1.4.C réduit les remplissages en volume vu la non adaptation de ces conteneurs à la capacité de charge des semi-remorques.

6.5.3.2.1.3 Le nombre moyen de hubs utilisés et délais de livraison

L'une des craintes que l'on pourrait avoir, en ce qui concerne le développement de l'Internet Physique, est qu'il nécessite le passage par un grand nombre de hubs et les conséquences en termes de coût ou de délai compromettent son fonctionnement. Les résultats présentés dans la Figure 70 montrent une moyenne de 2.43 PI-hubs pour les scénarios 1 et 2. Ce nombre s'élève à trois dans le scénario qui inclut l'utilisation des chemins de fer, ce qui se justifie par les deux ruptures nécessaires pour prendre le train. Ce réseau diminue donc la barrière en termes de rupture de charge pour accéder à un moyen ferroviaire. C'est particulièrement le cas lors de l'optimisation basée sur la minimisation des émissions de CO₂ (scénario 2.3.E).

Le minimum de transbordements se trouve dans les scénarios où nous cherchons à transporter nos flux le plus rapidement possible à leur destination, ce qui limite le nombre de chargements et de déchargements dans les hubs intermédiaires (scénario 2.3.T).

On remarque également que dans le cas du scénario 3, nous évitons un passage par l'entrepôt (nous avons des flux directs entre les usines et les centres de distribution), ce qui peut être considéré comme équivalent à un passage par un Hub pour la manutention. Pour l'homogénéité de la comparaison, il faudrait donc retirer une unité des valeurs indiquées. Donc, le résultat pour ce dernier scénario est un nombre de transbordement inférieur à 2, soit moins que les scénarios précédents.

Pour plus d'information concernant les flux journaliers traités par les hubs, l'annexe 3 fournit un exemple de statistiques pour le scénario 2.3.C.

D'autres hypothèses implicites ont été prises dans ce modèle de simulation, comme la capacité infinie des infrastructures routières et ferroviaires ou encore celle des hubs.

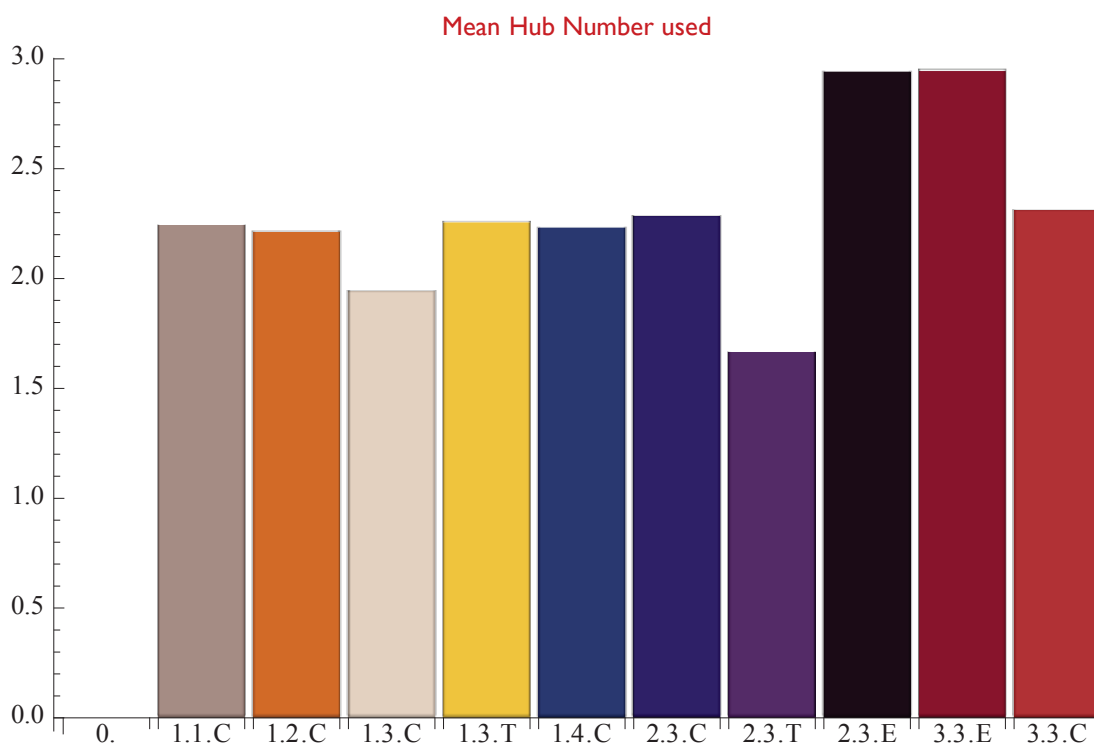


Figure 70: Nombre moyen de passage par hubs-entrepôts par scénarios

Au niveau des délais de livraison dans les scénarios 1 et 2, on observe (Figure 71) que l'Internet Physique a besoin en moyenne de 2 à 4 heures de plus pour livrer les commandes, sauf dans le scénario 1.1.C où c'est inférieur car il n'y a plus d'attentes au niveau des hubs vu que les conteneurs de 12 m donnent des niveaux de chargements satisfaisants et le scénario

1.4.C où cela est supérieur étant donné la réduction du nombre de conteneurs dans le système et par suite la réduction des possibilités de regroupements. Il faut noter que malgré le passage par des hubs, le scénario 1.1.C donne des délais inférieurs à ceux du scénario 0. En effet, le temps des passages par les hubs est masqué par la réduction que l'on verra drastique du nombre de nuitées. De plus, le scénario 1.1.C nous donne le potentiel que l'on pourrait rechercher, en termes de délais, car il n'y a plus dans ce scénario d'attentes dans les hubs.

Cette différence de 4 heures de délai de livraison pour 1 ou 2 jours de délai de réception (traitement de commandes + livraison) n'est pas aberrante dans le cadre de la grande distribution. Dans le détail de nos données, on voit que les flux sont presque systématiquement livrés dans les 24 heures.

Pour le scénario 3, le délai est supérieur. Cependant, nous devons mettre cela en perspective, car les flux de ce scénario se situent entre deux stocks avec élimination du point de passage obligé, à savoir les entrepôts. Le scénario 3 devrait au moins être comparé à deux transports (en amont et en aval de l'entrepôt), sans compter le temps de stockage dans l'entrepôt. Dans l'absolu, il offre des délais de livraison beaucoup plus faibles que les autres scénarios, car il connecte directement entre les usines et les centres de distributions.

Nous vérifions bien que dans les scénarios de l'Internet Physique, le temps de transport le plus faible correspond bien aux scénarios dont la fonction-objectif du routage est de minimiser le temps (à l'occurrence le scénario 2.3. T ici).

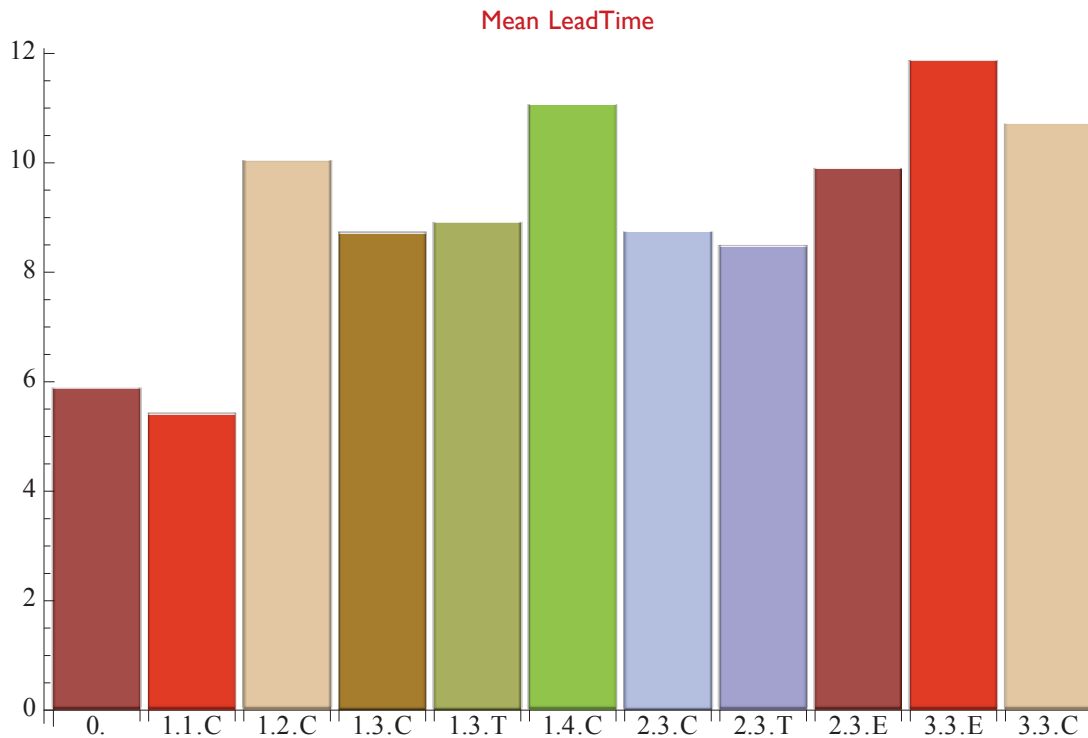


Figure 71: Délai de livraison moyen des conteneurs (en heures) par scénarios

6.5.3.2.1.4 Analyse des coûts

Tout au long de la simulation, nous avons pris en considération les paramètres de coûts réels pour le transport par camion, le transport ferroviaire, le transbordement, le chargement et le déchargement des palettes. Nous avons ensuite déterminé les coûts spécifiques aux concepts de l'Internet Physique, tel que la manutention des PI-conteneurs, leurs locations, à partir des coûts des conteneurs maritimes actuels, via des rapports de volume. Nous avons été, à ce titre, prudents de façon à ne pas réduire les coûts dans le contexte de l'Internet Physique, même s'ils sont censés être plus faible. Nous avons également supposé que le chargement et le déchargement des palettes dans un camion coûte le même montant que celui de chargement et de déchargement des conteneurs, comme si nous avions des palettes à l'intérieur des conteneurs.

Le calcul des coûts comprend : les coûts d'énergies (gasoil), de moyen de transport (camion, train), de manutentions (PI-conteneurs, palettes), de transit, entré/sortie des stocks, de stockage et de location des PI-conteneurs. Parmi ces coûts, celui du stockage présente une difficulté particulière et nécessite d'établir des hypothèses pour sa modélisation. Nous détaillons donc la méthodologie suivie dans ce sens, puis nous reviendrons aux résultats obtenus.

Composantes modélisées des stocks

L'objectif est d'évaluer les coûts liés au stockage des produits, permettant ainsi de comparer les scénarios entre eux. Les deux composantes principales d'un stock sont : le stock de cycle (Cycle Inventory) qui représente le stock permettant de répondre à la demande en attendant les livraisons, et le stock de sécurité qui permet de répondre à des éventuels aléas de la demande (Chopra et al. 2004). Dans notre réseau PI, nous avons trois type de nœuds où le stockage est possible : les usines, les entrepôts et les centre de distributions (les PI-hubs n'ont pas vocation à stocker dans les scénarios simulés). N'ayant pas de données sur les flux sortant des centres de distributions (CD), et ces flux étant identiques entre les scénarios, nous faisons l'hypothèse que les niveaux de stock dans les CD sont insensibles aux scénarios. Par conséquent, nous avons décidé de ne pas évaluer les stocks dans les centres de distributions. De plus, les usines et les entrepôts n'ont pas les mêmes fonctions suivant que l'on est dans les scénarios 0,1 et 2 ou le scénario 3.

Dans les scénarios 0, 1 et 2, qui gardent la même structure de la chaîne d'approvisionnement actuelle, les usines transfèrent la gestion de leurs stocks vers les entrepôts. En effet, l'un des avantages principaux des entrepôts est de dissocier les activités de production et de stockage, permettant aux usines de se concentrer sur leurs activités principales. Ainsi, la variation de la demande sera absorbée au niveau d'entrepôt, donc où le stock de sécurité se présente. Contrairement aux entrepôts, on peut faire l'hypothèse qu'il n'y a pas la composante stock de sécurité dans les usines.

Concernant les stocks de cycle, on procède de deux manières différentes pour les évaluer selon qu'il s'agisse des usines ou des entrepôts. Les flux que nous utilisons dans notre modèle de simulation représentent les expéditions réelles ainsi que les tailles d'approvisionnements nécessaires pour répondre aux demandes. Ce sont ces flux d'entrée et de sortie des stocks dans les entrepôts qui permettent d'évaluer les stocks de cycles (via la simulation). N'ayant pas de données sur les rythmes de production des usines, et donc sur les flux d'entrées, nous procédons autrement pour évaluer les stocks de cycle dans les usines via une modélisation présentée dans la partie relative au calcul de coût de stock.

Dans le scénario 3, on change la structure de la chaîne logistique en dispensant des entrepôts traditionnels et les flux sont directement expédiés vers leurs destinations finales via le réseau

PI (en gardant les mêmes demandes au niveau de centres de distribution). Ainsi, le stockage n'a lieu qu'au niveau des usines qui devront intégrer, en plus des stocks de cycles, des stocks de sécurité leur permettant de pouvoir répondre à des variations de la demande.

Le Tableau 21 résume donc les différents stocks que l'on considère dans les PI-nœuds selon les scénarios. Il est à noter que dans les différents scénarios que l'on a définis, les PI-hubs n'ont en aucun cas une fonction de stockage.

Tableau 21: Les stocks modélisés dans les usines et entrepôts selon les scénarios.

Famille de scénarios	Entrepôts		Usines	
	Stock de Sécurité	Stock de cycle	Stock de Sécurité	Stock de cycle
0, 1, 2	A calculer	A calculer	0	A calculer
3	0	0	A calculer	A calculer

Le calcul des coûts du stockage

Le calcul des coûts de chacune de ces composantes des stocks passe d'abord par l'évaluation du niveau des stocks. D'autres part, les coûts de stockage comprennent les coûts d'acquisition (passation de commandes, réceptions, contrôle...), les coûts d'immobilisation (Intérêts de l'argent immobilisé) et les coûts de possessions (charges de locations, de mains d'œuvres, manutentions, impôts...). Nous considérons ici uniquement les coûts relatifs à d'immobilisation et ceux de possessions. C'est ainsi que nous présentons maintenant les méthodologies employées pour l'évaluation des coûts des stocks de sécurité et des stocks de cycle.

Pour évaluer les niveaux des stocks de sécurité, on suppose que le délai d'approvisionnement est fixe et égale à 1 semaine. Dans ce cas, l'Eq.5 donne la formule pour le calcul du Stock de Sécurité (SS) (Michel 2005):

$$SS = Z * \text{Ecart Type de la demande hebdomadaire} * \sqrt{\text{Délais d'approvisionnement}} \quad \text{Eq. 5}$$

$$Z: \text{facteur de sécurité, qui représente le niveau de service demandé} \quad \text{Eq. 6}$$

Les écarts types de la demande hebdomadaire sont calculés sur l'ensemble de la période des flux. Afin de déterminer le facteur de sécurité, nous considérons un taux de rupture lors de l'approvisionnement de 2% (valeur conforme à celle des acteurs intervenant dans nos flux), et que la demande hebdomadaire suive une loi normale, soit $Z = 2.05$.

En effet, un stock de sécurité permet de palier à des écarts non prévus de la demande par rapport à la demande moyenne. La demande est ici représentée par les flux hebdomadaires entre les industriels et les centres de distribution. En dehors des produits en GPA (gestion partagée des approvisionnements) cette demande reste inconnue pour les fournisseurs. N'ayant pas accès aux fournisseurs pratiquant la GPA nous ne prenons pas en compte celle-ci. Ceci peut être vu comme une hypothèse majorante des stocks.

La probabilité de rupture dans un cycle de réapprovisionnement s'appuie sur le modèle classique de stock de sécurité appliqué à 11315 flux. La détermination de la probabilité de rupture repose sur l'hypothèse d'une distribution de l'aléa suivant une loi normale. Nous avons donc cherché à vérifier si celle-ci était vérifiée. Dans ce but nous avons réalisé sur les flux précédemment mentionnés un test de normalité appliqué à la variation de la demande hebdomadaire. Le test utilisé est celui de Kolmogorov-Smirnov du logiciel Mathematica. Avec une probabilité d'erreur de rejet de 5% il apparaît que 5288 flux peuvent être considérés comme suivant une loi normale. Dans la plupart des cas où la demande hebdomadaire est normale on constate un profil de demande comme sur la Figure 72:

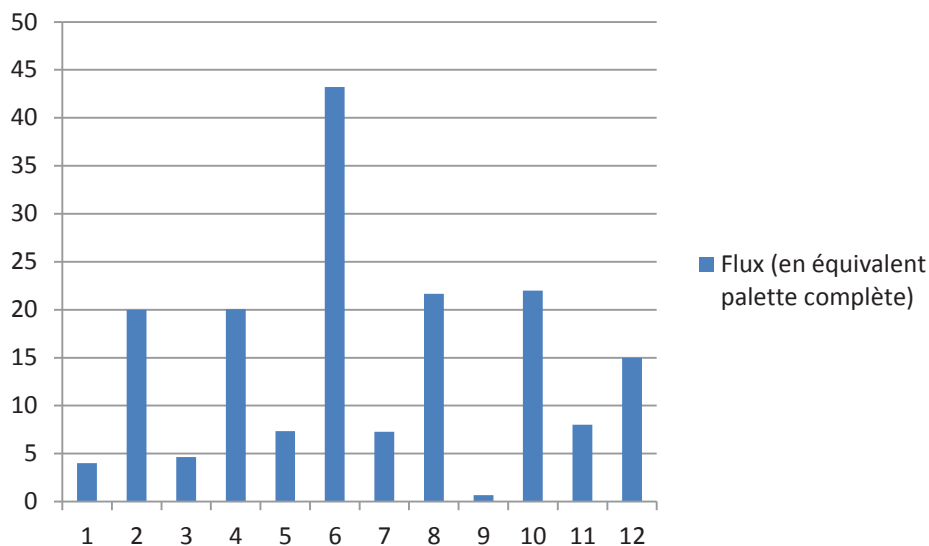


Figure 72: Exemple de flux hebdomadaire entre entrepôt et centre de distribution (flux sur 12 semaines)

Dans les cas où elle ne l'est pas, on remarque des profils tels que donné par la Figure 73. Dans ce cas, la variance de la demande est négligeable et le stock de sécurité aussi.

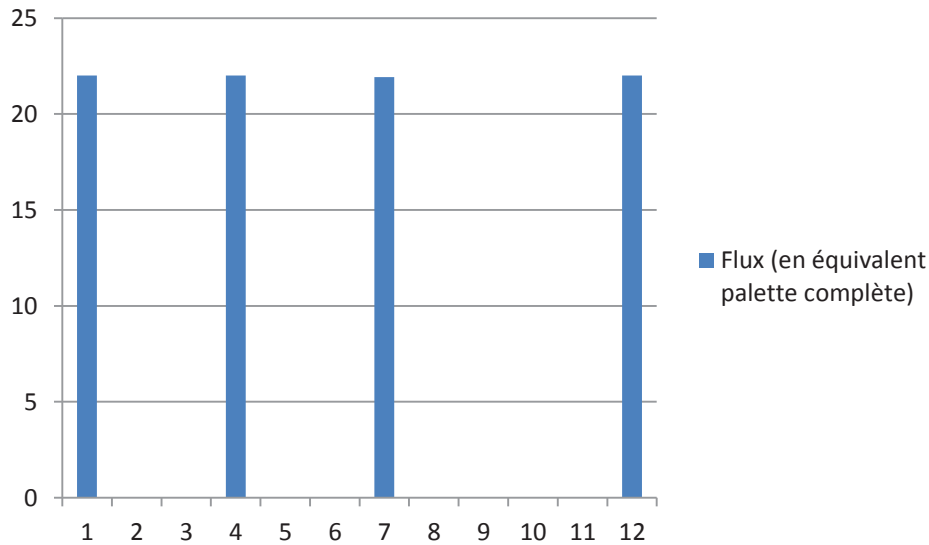


Figure 73: Autre exemple de flux hebdomadaire entre entrepôt et centre de distribution (flux sur 12 semaines)

Par souci de systématisation on a appliqué la formule de stock de sécurité à tous les flux, sachant que lorsque la variance est négligeable le stock de sécurité résultant sera lui aussi négligeable.

Ensuite, le calcul des coûts de stock de sécurité se fait ensuite via les Eq.7 et Eq.8.

$$\text{Coût d'immobilisation} = SS * \text{Valeur du produit} * \text{Taux d'immobilisation} * \text{Temps} \quad \text{Eq. 7}$$

$$\text{Coût de possession} = SS * \text{Coût stockage unitaire} * \text{Temps} \quad \text{Eq. 8}$$

Considérons maintenant l'évaluation du stock de cycle.

Dans le cas des entrepôts, ayant les flux entrées et sorties, le stock de cycle moyen (SM) journalier est déterminé par la simulation. Puis le calcul des coûts de stock de Cycle se fait suivant les Eq.9 et Eq.10.

$$\text{Coût d'immobilisation} = SM * \text{Valeur du produit} * \text{Taux d'immobilisation} * \text{Temps} \quad \text{Eq. 9}$$

$$\text{Coût de possession} = SM * \text{Coût stockage unitaire} * \text{Temps} \quad \text{Eq. 10}$$

Dans le cas des usines, l'évaluation du stock de cycle ne peut pas se faire comme dans le cas des entrepôts car nous ne disposons pas des données de la production. Nous proposons donc ici une modélisation des stocks de cycles.

Si nous considérons l'hypothèse que les expéditions des usines sont réparties uniformément dans le temps, et que le rythme de production est uniforme, le stock moyen serait égal à la moyenne des expéditions divisé par 2 (Daganzo 2005). La Figure 74 donne l'allure d'un stock-usine (pour un produit) dans le cadre de ces hypothèses.

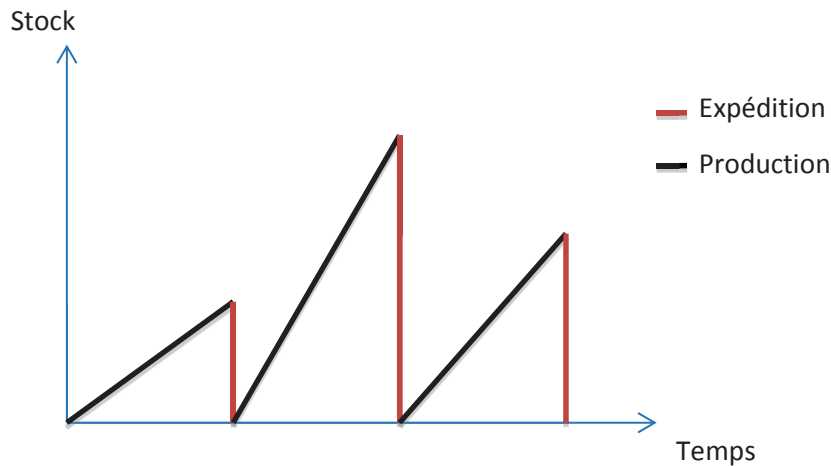


Figure 74: Exemple de variation d'un stock-usine dans les hypothèses du modèle

Nous nous plaçons donc dans ces hypothèses pour calculer les stocks des usines. Ainsi, nous avons calculé le stock moyen (SM), pour chaque produit, selon l'équation :

$$SM = \frac{\text{Moyenne des tailles d'Expéditions hebdomadaires}}{2} \quad \text{Eq. 11}$$

Puis nous calculons les coûts d'immobilisation et de possession selon les Eq.9 et Eq.10.

L'ensemble des valeurs des paramètres est indiqué dans l'annexe 2, et un exemple de résultats obtenus pour les coûts des stocks de cycle et de sécurité est disponible dans l'annexe 3.

Ces modélisations des composantes des stocks sont certes simplificatrices de la réalité, mais nous permettent une première évaluation des coûts engendrés par le stockage et surtout de comparer les scénarios entre eux. Analysons donc les évolutions de coûts engendrés par nos scénarios.

Résultats et analyse des coûts obtenus

La Figure 75 montre et confirme encore le fait que les scénarios de l'Internet physique sont une solution dominante en termes de mobilité des marchandises. Nous avons aussi noté des diminutions des coûts entre le système logistique actuel et celui que l'on propose pour l'Internet Physique. En effet, les coûts logistiques seraient réduits entre 4 % et 33% selon les

scénarios. Seul le scénario 1.2.C qui utilise uniquement de petits conteneurs augmentant ainsi les coûts de manutention et de conteneurisation, est plus coûteux que la solution actuelle (scénario 0).

On voit également l'effet de la conteneurisation : le scénario 1.3 qui présente un choix multiples de tailles de conteneurs donne un meilleur résultat que les scénarios 1.1 et 1.2 qui imposent une taille unique de conteneurs. Il est au aussi meilleur que le scénario 1.4 qui propose un jeu de conteneurs plus réduit. En effet, la limitation des variétés de conteneurs est une source d'espace de chargement non seulement au niveau du conteneur (non toujours adapté à la taille des expéditions) mais aussi au niveau des moyens de transport.

Le scénario 2 est plus efficace en termes de coûts que le scénario 1 et cela est principalement dû à l'utilisation des trains. Le scénario 3 est encore plus efficace parce qu'il permet non seulement d'éviter les détours vers des entrepôts, mais aussi de réduire les lieux de stockage et par suite les besoins en stock de sécurité.

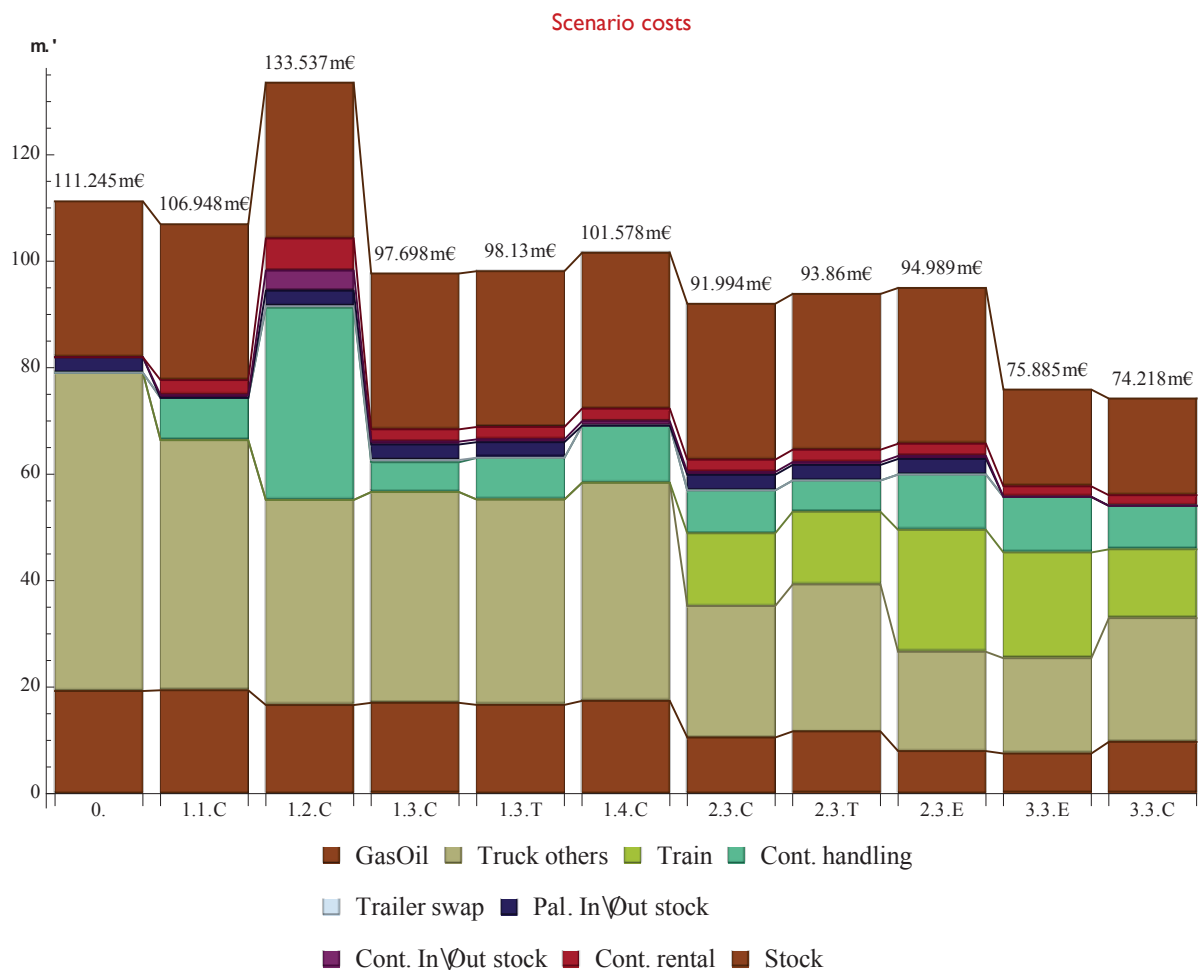


Figure 75: Répartition des coûts

En outre, nous avons utilisé notre modèle pour modifier les coûts afin de vérifier la robustesse de l'Internet physique. Par exemple, nous sommes en mesure de modifier les prix du gasoil, le prix de manutention de conteneurs, etc. La dominance de l'Internet physique a été démontrée avec d'importants changements de prix comme par exemple en fixant 150 € pour le transbordement d'un conteneur de 12 m dans un hub, ce qui est très au-dessus des prix actuels. Une augmentation des coûts du pétrole est en faveur de l'organisation physique d'Internet.

6.5.3.2.2 Indicateurs environnementaux

6.5.3.2.2.1 Les tonnes/Km

Il s'agit d'un indicateur en même temps économique et environnemental.

Au niveau des t.km on note une augmentation de celles-ci sur les scénarios 1 et 2 (Figure 76). Cette augmentation de quelques pourcents (hors 2.3.E) s'explique par le fait qu'on ajoute la structure du réseau de l'Internet Physique entre les maillons des chaînes logistiques actuelles. Il en résulte nécessairement des détours. A l'inverse, pour le scénario 3, dès que le réseau de l'Internet Physique commence à remettre en cause l'organisation actuelle alors nous voyons une diminution entre 2% et 10% des t.km. Celle-ci serait certainement encore plus nette dans des scénarios où les centres de distribution seraient également remis en cause, dans une remise en cause plus globale de la chaîne logistique.

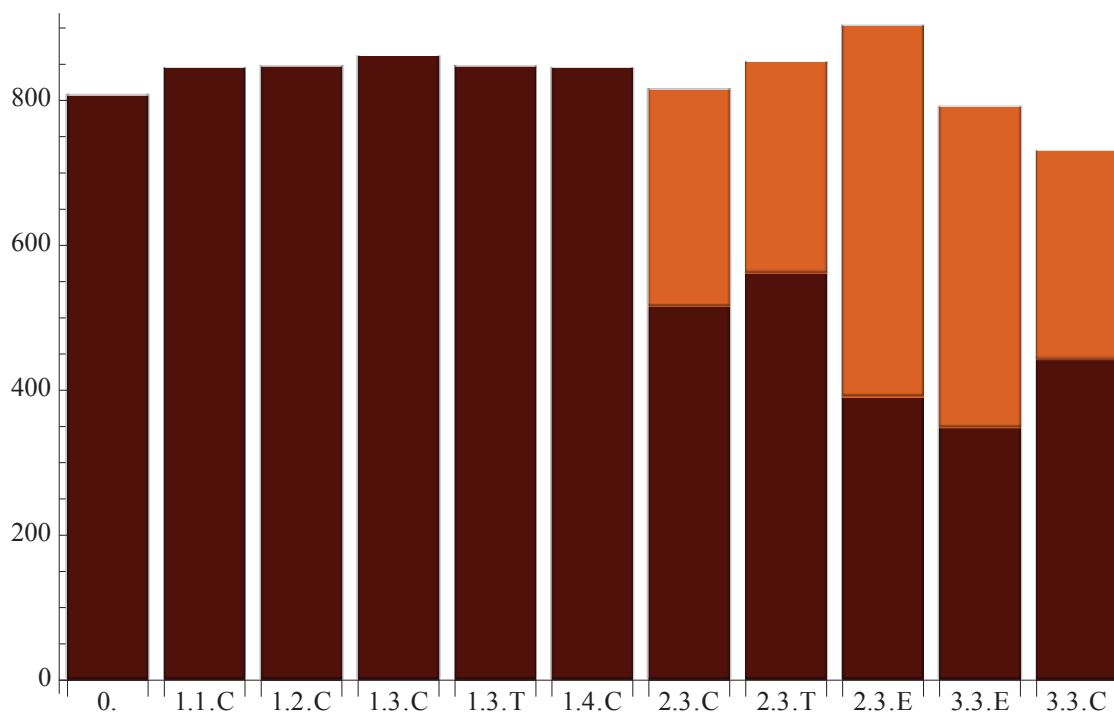


Figure 76: Million de t.km par variante des scénarios (les t.km ferroviaires sont en orange)

6.5.3.2.2 Les émissions en CO₂

Les émissions en CO₂ restent à ce jour un indicateur purement environnemental en transport, mais pourraient devenir également un indicateur économique en cas de taxation comme c'est déjà le cas dans certains pays européens. Dans notre étude, elles ne concernent que celles qui sont dues au transport car les émissions des entrepôts des produits concernés sont négligeables devant les autres. Deux moyens de transport sont pris en compte dans notre simulateur: le camion (25 tonnes - semi-remorque) et le train électrique. Pour évaluer leurs émissions en CO₂, nous utilisons les fonctions d'évaluation des émissions développées dans (Sarraj et al. 2012b) qui sont fondées sur le rapport MEET (Jorgensen et al. 1998, Hickman et al. 1999):

$$E(x) = 0.772 + 0.013 x; \frac{\text{kg CO}_2}{\text{km}}, \text{ Pour un camion}$$

$$E(x) = 0.0035 x; \frac{\text{kg CO}_2}{\text{km}}, \text{ Pour un train électrique}$$

x : Poids de la charge du camion ou du train en tonnes

De toute évidence, le train électrique est beaucoup moins polluant que les camions car la production d'électricité est très peu émettrice de GES en France.

C'est au niveau des émissions que nous constatons les résultats les plus spectaculaires (Figure 77). En effet, grâce à l'augmentation relative des taux de remplissage d'environ 17% et en dépit des kilomètres supplémentaires, on note une réduction significative des émissions, y compris en utilisant uniquement le transport routier (sauf pour le scénario 1.1).

Le scénario 1.1 émet légèrement plus que le scénario actuel vu l'augmentation des détours (dû à la structure du réseau PI qui remet en cause les réseaux d'approvisionnement actuels). En effet, le gain en remplissage étant faible (59% vs 62%), il ne permet pas de contrebalancer les coûts environnementaux supplémentaires causés par ces détours.

En outre, lorsque les trains électriques sont mobilisés, l'électricité à faible émission de GES en France permet une réduction drastique de l'ordre de 60%. Cette réduction est meilleure que celle donnée par l'approche de mutualisation (entre 14% et 50% selon (Pan et al. 2011)) car elle élargit considérablement le nombre d'acteurs impliqués et s'appuie sur un réseau de plates-formes ouvertes, créant ainsi davantage de possibilités pour consolider les flux et réduire les déplacements.

Plus encore que la consolidation (pooling), l'Internet Physique a la capacité de réduire les émissions sans concession sur la taille de la cargaison (expéditions). Il doit également être noté que ce résultat (environ -60%) sera exigé par la commission européenne en 2050.

Ces résultats, ont encore des marges de progrès liés à la reconfiguration des chaînes d'approvisionnement et à l'augmentation des volumes qui permettraient une augmentation de la consolidation.

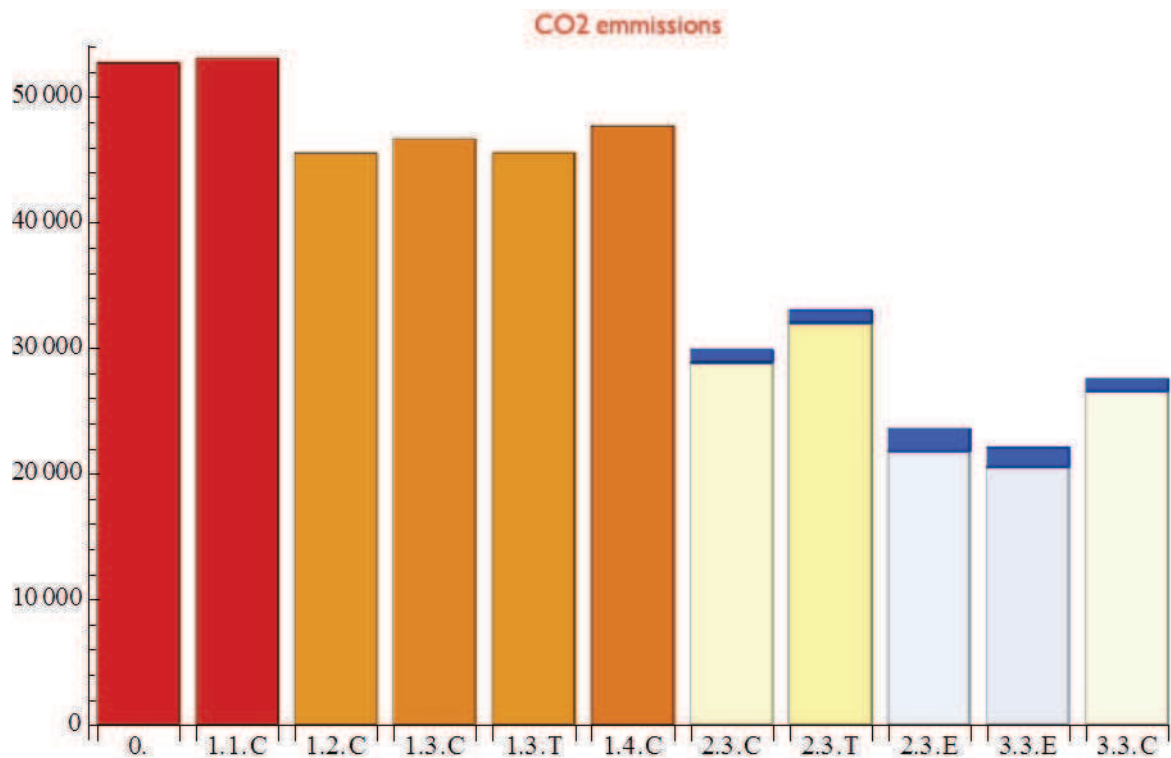


Figure 77: Les émissions en CO2 par scénario (les émissions ferroviaires sont en bleu)

Nous avons ainsi réussi à réduire considérablement les émissions en CO₂ entre les scénarios 1, 2 et 3, sans augmenter les coûts. Ces résultats relatifs à la contribution environnementale de l'Internet physique, bien que très importante, ont encore des marges de progrès liés au volume et à la reconfiguration des chaînes d'approvisionnement. Notamment, l'augmentation des volumes en ajoutant d'autres acteurs, permettrait l'augmentation de la part du transport multimodal.

6.5.3.2.3 Indicateurs sociétaux

L'impact sociétal doit être compris ici comme l'impact de l'Internet Physique sur quelques indicateurs. Deux indicateurs sont retenus, les nuitées pour les chauffeurs et le nombre de service de chauffeurs requis.

6.5.3.2.3.1 Les nuitées

Le premier indicateur est celui des nuits que les chauffeurs seraient amenés à passer en repos, ou en coupure quotidienne durant leur trajet dans l'hypothèse où il n'y aurait pas de deuxième chauffeur.

La Figure 78 suivante montre que l'Internet Physique a quasiment le potentiel de supprimer ce besoin. Le scénario 2 où l'on constate encore cette pratique relève en fait d'un cas de routage particulier où quand un transport par train prévu n'est pas possible, le segment de transport est basculé sur la route mais suivant le même itinéraire. Avec donc la potentialité de trajet dépassant un service normal.

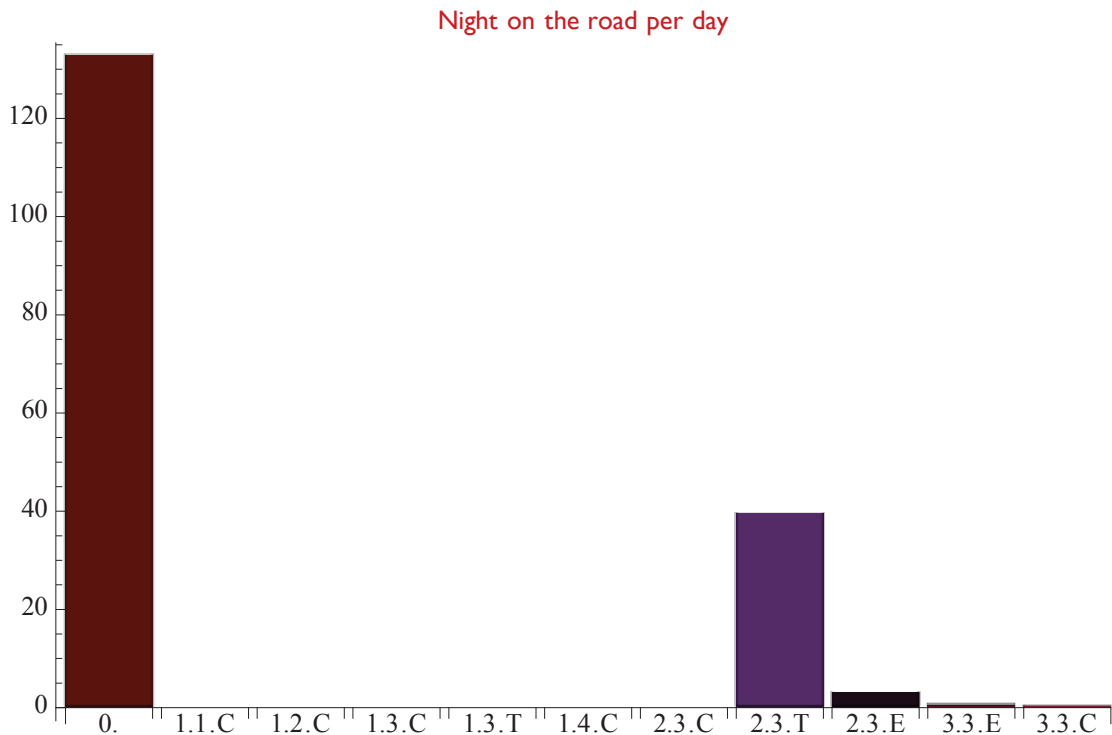


Figure 78: Variation des nuitées passées sur la route par jour par variante des scénarios

6.5.3.2.3.2 Le nombre de service requis

La Figure 79 et la Figure 80 montrent que l'Internet Physique par son efficacité réduit le nombre de service de conduite à pourvoir chaque jour et ceci dans des proportions importantes. Il ne faut pas cependant oublier d'une part qu'un tel système créerait d'autres emplois, notamment dans les hubs, les SI etc. et que les emplois supprimés sont des emplois peu recherchés du fait de leur pénibilité. En outre, il faut noter que le trafic routier généré est directement proportionnel à ces heures de conduite et diminuerait donc jusqu'à -64%, libérant ainsi de la capacité sur les infrastructures.

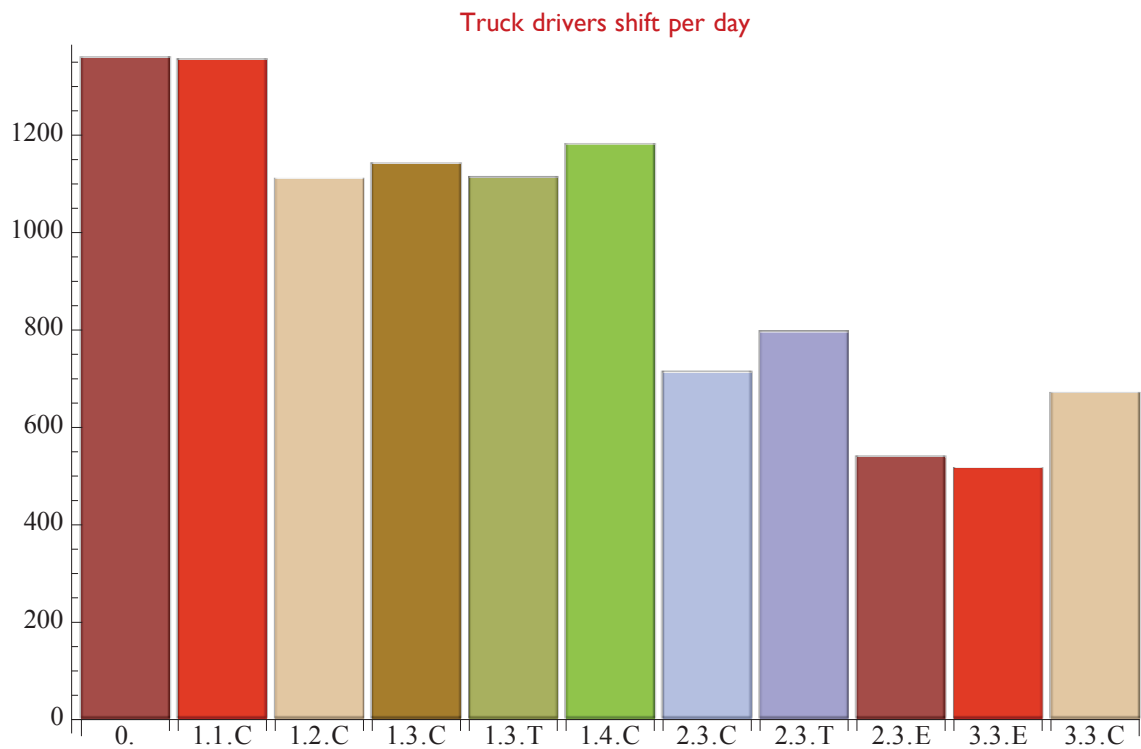


Figure 79: Variation des services de conduite en transport routier par variante des scénarios

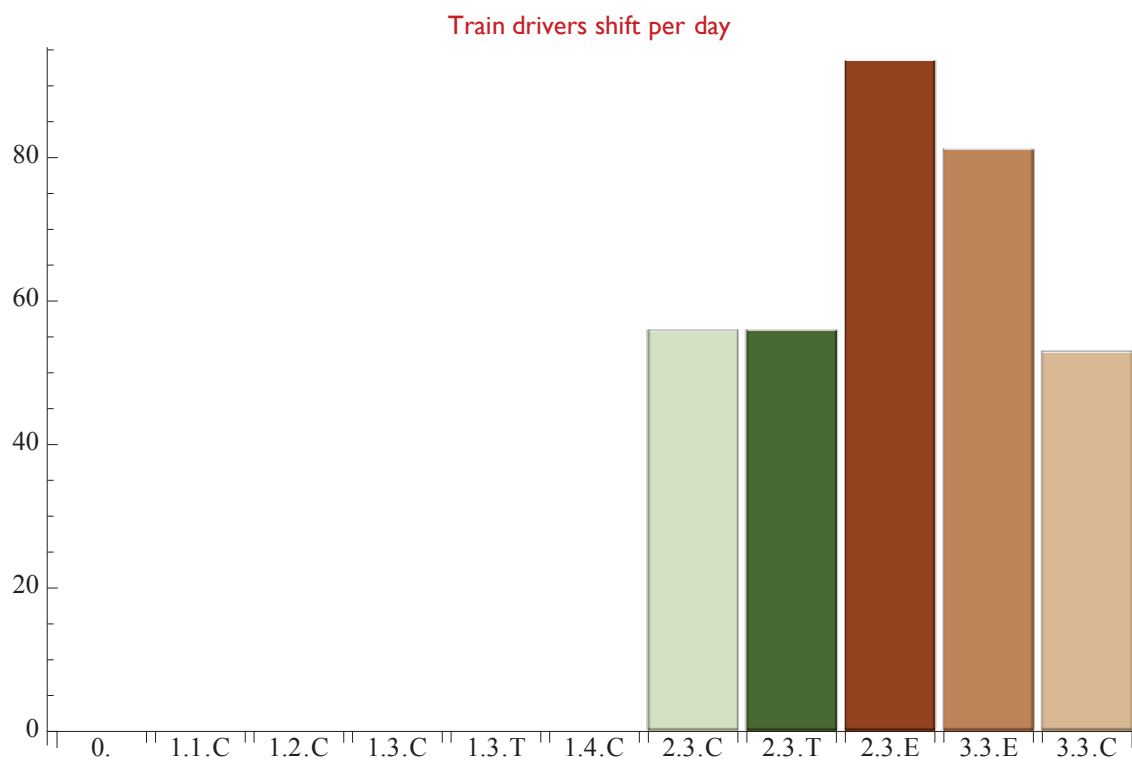


Figure 80: Variation des services de conduite en transport ferroviaire par variante des scénarios

Pour toutes ces évaluations nous nous sommes fondés sur le règlement européen de référence (CE 2006) qui prévoit 9h de conduite par jour en régime normal.

6.5.3.2.4 Conclusion

Dans ce travail, nous avons démontré par des données réelles du secteur de la grande distribution française, que le concept d'Internet Physique utilisé comme un processus visant à améliorer l'efficacité des transports donne des résultats très encourageants. La charge est augmentée de près de 20%, les nuitées presque disparues, l'utilisation du transport ferroviaire peut être importante et conduit à une réduction de 60% des émissions de CO₂ en France (grâce à la faible émissions en CO₂ de la production d'électricité en France), sans sacrifier les délais de livraison ni les coûts d'exploitation qui sont encore plus bas. De plus, l'ensemble des scénarios, hors tests de tailles de conteneurs, présente une réduction des coûts par rapport à la situation présente (entre 4% et 33% selon les scénarios). Ceci signifie qu'il n'est pas nécessaire de mettre en œuvre les dernières avancées de l'Internet Physique en un seul coup, et qu'il est possible par exemple de garder le concept actuel des entrepôts dédiés, visant ainsi un déploiement progressif du scénario 1, puis une mobilisation du ferroviaire, etc. Il est intéressant de noter que ces résultats ont été obtenus sans coordination supplémentaire entre les fournisseurs de services de logistique, sauf les informations nécessaires à l'acheminement. Il n'y a pas non plus de contraintes d'expédition. Tous les flux ont été envoyés de façon asynchrone.

Mais, jusqu'à présent l'Internet physique a seulement été testé avec des flux amonts de la chaîne logistique de la grande distribution. Il serait certainement encore plus performant si l'on considérait l'ensemble de la chaîne logistique. Cependant, travailler sur les flux aval nécessiterait de développer de nouveaux protocoles car de nouvelles exigences verraient le jour, comme la nécessité de gérer les tournées de véhicules.

Il serait également très intéressant d'étendre le champ d'application avec d'autres secteurs tels que l'industrie automobile qui nécessite des organisations et des spécifications très différentes.

6.6 Conclusion

Les résultats présentés ici sont novateurs car c'est la première fois que ce concept est implémenté dans un modèle et simulé sur des données réelles. De ce fait, les résultats obtenus par leur ancrage dans la réalité des pratiques actuelles donnent une crédibilité et un signal tout

à fait encourageant. Il est à noter de manière remarquable, que ces résultats sont cohérents avec ceux trouvés avec un modèle analytique qui relève d'une approche très différente, voir (Ballot et al. 2011, Sarraj et al. 2012b) à ce sujet.

6.6.1 Des premiers résultats qui montrent des gains significatifs

Les résultats économiques et environnementaux montrent une situation où un gain est possible sur les deux plans en même temps et ce de manière significative. Le gain effectué en efficience sur le transport bénéficie à la fois à l'environnement au sens large mais aussi « paye » les ruptures de charge nécessaires.

Au niveau environnemental, l'Internet Physique, associé à des moyens de transport lourds et peu émetteurs de GES, propose une organisation qui recèle le potentiel de satisfaire aux objectifs de réduction des émissions du transport de l'ordre de -60% en 2050 (European Commission 2011), ce résultat est d'autant plus important que les autres pistes (éco-conduite, carburant, etc.) sont insuffisantes par rapport à l'objectif.

A ce titre, il convient de souligner que ce type d'organisation, réseau ouvert et interconnecté, est un moyen de généraliser la mutualisation (Crujssen et al. 2007b, Pan et al. 2011, Crujssen 2012) dont les vertus sont connues mais qui peinent à se mettre en place de manière significative. On compte quelques cas qui existent et des nombres limités de participants pour ceux-ci. Une dizaine en France en 2013 avec 3 à 6 participants à chaque fois.

Les résultats montrent également la sensibilité aux choix des ensembles de conteneurs, notamment entre le jeu complet de 1,2m à 12m et la limitation au plus court ou au plus long. Pour autant, il est trop tôt pour conclure sur ce sujet car l'impact de la taille des conteneurs sur les coûts d'immobilisation et de stockage des conteneurs est tout à fait majeur et n'a pas été pris en compte à ce stade.

On constate en outre une augmentation des délais de livraison de quelques heures qui apparaît peu significative quand on considère la durée du processus complet, qui va de l'expression du besoin à la livraison d'une part, et au fait que ces transports (hors livraison aux magasins) sont effectués entre des stocks d'autre part.

Enfin, il convient de ne pas négliger les changements potentiellement très importants que l'Internet Physique pourrait avoir sur le transport et les prestataires logistiques au niveau de leur stratégie et de leur modèle économique.

6.6.2 Malgré les limites de cette première simulation

Cette première simulation, parce qu'elle est ancrée dans la réalité des opérations, introduit en fait plusieurs biais dans les résultats qui sont autant de sources d'amélioration de ceux-ci mais malheureusement non atteignables par le modèle en l'état.

Un premier biais est introduit par la structure même des réseaux logistiques. En effet, les données récupérées traduisent les contraintes existantes. Citons le passage par les entrepôts ou les centres de distribution et leur localisation. Ces éléments sont de nature à brider la performance de l'Internet Physique et évolueraient nécessairement dans le temps si un tel système voyait le jour. Le scénario 3 par les gains significatifs supplémentaires qu'il apporte par rapport au scénario 2 est le témoin d'une partie de ce potentiel.

Le second biais qui vient limiter l'impact de l'Internet Physique est la structure de la demande. En effet, ici aussi, la demande représentée par les commandes émises par les centres de distribution, est structurée par les contraintes de la chaîne logistique (camion complet, palette homogène, etc.) traduites ensuite en barème quantitatif. Ainsi quand dans le scénario 1.2 on propose de diminuer drastiquement la taille des conteneurs ou simplement d'offrir une gamme, nous n'avons pas de commandes adaptées. Pour se convaincre qu'elles sont adaptées à la taille des remorques il suffit de constater la surreprésentation des conteneurs de 12m dans les scénarios. Dépasser cette contrainte nécessitera de redéfinir les commandes en fonction des jeux de conteneurs disponibles. Mettre en évidence cet impact à sa juste mesure, requiert un modèle complet de génération de la demande couplé à la simulation des stocks et à leur gestion. Éléments qui ne sont pas encore implémentés à ce stade dans ce modèle.

Enfin, les volumes, même s'ils sont non négligeables restent faibles par rapport à l'ensemble des volumes adressables au niveau national (1.5% en t.km du trafic de marchandise en France). Donc les hubs, leur taille, la fréquence des services, le report modal,... doivent être considérés comme des bornes inférieures du potentiel de l'Internet Physique. En effet, la performance de l'Internet Physique est liée aux volumes expédiés.

6.6.3 Les nouvelles perspectives pour la simulation

Ce premier travail ouvre de nombreuses perspectives de recherches. La première est l'amélioration des algorithmes de routage pour les rendre plus dynamiques en tenant compte des effets de rétroaction sur le temps des effets de sous charge ou de surcharge du réseau. A ce titre une voie est d'utiliser les délais de voyage pour anticiper les tris, équilibrer les départs

ou les adapter. Une autre piste d'amélioration dans cette perspective d'un routage plus dynamique serait d'augmenter les possibilités de regroupements des conteneurs via par exemple des approches stigmergiques, à l'image de ce qui a été fait pour le routage des pièces dans un environnement FMS - Système de fabrication flexible (Sallez et al. 2009).

La seconde est la possibilité d'avoir plusieurs niveaux de conteneurs qui encapsulent la marchandise et ainsi d'avoir plusieurs niveaux de regroupement. On pourrait ainsi avoir de petits conteneurs remplis dans les usines et dédiés directement à la mise en rayons dans les points de ventes ou la livraison chez les consommateurs.

La troisième est de remettre en cause la structure actuelle de la chaîne logistique, afin de plus profiter du réseau ouvert de l'Internet Physique et ainsi pouvoir expédier les conteneurs partout dans le réseau interconnecté. Ceci a été partiellement fait via l'élimination du point de passage obligé (les entrepôts) lors du scénario 3. Mais, on pourrait aller plus loin, en considérant l'ensemble de la chaîne logistique et éliminant non seulement les entrepôts mais aussi les centres de distributions dédiés. Dans cette perspective, les hubs pourraient alors jouer le rôle de centres de stockage distribués et interconnectés.

Chapitre 7 : Conclusion et perspectives

7.1	Les apports de ce travail de recherche	221
7.2	Les limites principales	223
7.2.1	Limites des protocoles proposés pour l'Internet Physique	223
7.2.2	Limites du modèle de simulation	224
7.2.3	Limites de l'évaluation des coûts	225
7.3	Les perspectives de recherche : la concrétisation	225
7.3.1	L'adhésion des parties prenantes au concept de l'Internet Physique	225
7.3.2	La mise en œuvre technologique.....	226
7.3.3	La mise en œuvre organisationnelle.....	227

Chapitre 7. Conclusion et perspectives

Ce chapitre de conclusion générale va classiquement présenter une synthèse des principaux apports de ce travail de recherche, avant d'en exposer les limites puis de souligner les différentes perspectives qu'il offre dans le cadre de l'interconnexion des réseaux logistiques.

7.1 Les apports de ce travail de recherche

Ce travail de recherche a eu pour but d'étudier une solution permettant de mieux consolider les flux et ainsi d'améliorer les performances du transport de marchandises en proposant une interconnexion de différents réseaux logistiques qui sont actuellement dédiés. L'Internet Physique (PI) est un concept innovant à l'origine de cette approche et c'est dans ce contexte que l'on a choisi de situer ce travail, même si l'interconnexion des réseaux logistiques pourrait prendre d'autres formes.

Afin d'étudier la définition de ce nouveau modèle logistique, nous avons identifié les éléments clefs nécessaires à l'interconnexion des réseaux logistiques. Nous avons ainsi montré l'intérêt d'une conteneurisation standardisée et modulaire, adaptée aux dimensions des palettes et à celles des moyens de transport. Puis, nous avons analysé les questions de la topologie possible du réseau Internet Physique et des échanges de flux de modules standardisés entre les différents acteurs. Ensuite, nous avons choisi de nous focaliser sur le routage et le transport de conteneurs PI standardisés, étape nécessaire afin de mesurer les performances d'un tel système. Nous avons pour cela proposé des algorithmes adaptés à un cadre général, puis des protocoles plus opérationnels conformes aux pratiques de notre secteur d'étude, à savoir, la distribution des produits de grande consommation, afin de pouvoir construire un modèle de simulation. Cette recherche a permis de montrer, d'une part, que l'interconnexion des réseaux informatiques réalisée par Internet présente effectivement des analogies avec celle envisagée pour les réseaux logistiques, et, d'autre part, qu'il existe des différences majeures dès lors que l'on s'éloigne des concepts généraux pour appréhender les besoins réels des chaînes logistiques. En effet, même si nous avons transposé, les concepts de l'Internet, pour définir des concepts généraux telle que la nécessité d'une standardisation dans les échanges de flux (conteneurisation), on note tout de même que les solutions apportées diffèrent de celles des réseaux informatiques. Nous avons ainsi montré qu'il était

inconcevable de définir un unique standard de conteneurs, à l'image des datagrammes utilisés par le protocole TCP/IP, pour l'ensemble des réseaux logistiques. C'est ainsi qu'une offre de conteneurs modulaires et standardisés a été proposée. De plus, les protocoles de conteneurisation, de groupage des conteneurs, d'acheminement et d'affectation aux moyens de transport que l'on a développés, sont différents de ceux utilisés dans les réseaux informatiques. Certains d'entre eux n'ayant pas d'équivalent dans Internet.

Pour valider l'approche proposée, nous avons développé un modèle de simulation du routage et des transports des marchandises conteneurisées dans un réseau Internet Physique, utilisant des données réelles de la grande distribution française. L'intérêt de cette simulation a été, non seulement, de mesurer les performances potentielles d'une telle interconnexion et des principaux algorithmes proposés, mais aussi, de développer les protocoles nécessaires à la mise en œuvre de l'interconnexion des réseaux. A titre d'exemple, il a fallu définir des protocoles pour conteneuriser les marchandises, définir les routes des conteneurs, gérer les files d'attente dans les différents points du réseau ainsi créé, définir les méthodes de chargement des moyens de transport, etc. Des résultats très prometteurs ont été obtenus.

D'un point de vue environnemental, nous avons vu que certains scénarios de l'Internet Physique pouvaient conduire à une réduction des émissions en CO₂ par un facteur proche de 3, et ceci grâce d'une part au niveau de consolidation atteint et d'autre part à l'utilisation de moyens de transport lourds et peu polluants (trains électriques). En comparant les taux atteints avec les objectifs de la commission européenne, à savoir une réduction des émissions par un facteur entre 4 et 5 d'ici 2050, on constate que PI combiné à d'autres progrès technologiques faits au niveau des moyens de transport pour réduire leurs émissions, est une solution envisageable.

D'un point de vue financier, en parallèle des réductions en émissions en CO₂, nous avons aussi noté des diminutions des coûts entre le système logistique actuel et celui que l'on propose pour l'Internet Physique. En effet, ils seraient réduits entre 4 % et 33% selon les scénarios (utilisation ou pas de trains, critère de routage choisis, etc.).

Il est à noter que ces performances économiques et environnementales sont partielles, car les résultats de nos simulations sont obtenus sans remise en cause ni des localisations des sites logistiques actuels (entrepôts, centre de distributions), ni des réseaux de distribution où les stocks sont répartis. De plus, les données de notre cas d'étude étant limitées, les résultats de

performances obtenus le sont également car les possibilités de consolidation en sont impactées.

Il faut enfin souligner qu'il s'agit du premier travail de recherche consacré à l'étude des gains potentiels de l'Internet Physique.

7.2 Les limites principales

Les limites de ce travail concernent principalement les protocoles proposés pour l'Internet Physique, le modèle de simulation retenu et les résultats obtenus dans un cadre sectoriel. L'ensemble de ces limites constitue en soit aussi des perspectives de recherches futures.

7.2.1 Limites des protocoles proposés pour l'Internet Physique

Les protocoles proposés ne prennent pas en considération l'ensemble des éléments intervenant dans les réseaux logistiques. Ainsi, notre travail de recherche s'est concentré particulièrement sur l'aspect du transport qui ne représente qu'un maillon de la chaîne logistique. Il serait donc intéressant de développer les protocoles relatifs à la gestion des stocks, ceux d'une conteneurisation adaptée aux spécificités de la marchandise transportée, ou encore la gestion des moyen.

Les modèles de gestion de stock partent du postulat qu'une demande est servie par un stock et non par un ensemble de stocks. Un tel changement de paradigme (déploiement progressif des produits vers les marchés), avec une possibilité d'approvisionnements multiples remet en cause l'équilibre actuel entre stockage et transport et donc la conception des réseaux logistiques, la possession des stocks, etc. De même, la définition précise des protocoles d'échanges de données entre les partenaires logistiques n'a pas été abordée. Un travail complémentaire est à entrevoir pour identifier comment adapter les systèmes EDI (Echanges de Données Informatisés) dans une logique d'interconnexion.

Nous avons aussi montré que les modèles d'affaires actuels dans le domaine de la logistique seront clairement impactés par l'Internet Physique. Néanmoins, les gains engendrés par cette interconnexion supposent que l'on développe un modèle d'affaires permettant de partager la valeur ainsi créée, d'une manière durable entre les différents intervenants du réseau constitué.

De plus, la construction du réseau de l'Internet physique doit prendre en considération le besoin réel de la logistique :

- La nécessité d'une prise en compte d'une ségrégation résiduelle des marchandises conteneurisées car certaines marchandises ne peuvent pas être transportées avec ou au-dessus d'autres pour des questions de sécurité.
- La conteneurisation des produits frais apporte des contraintes supplémentaires.
- Etc.

7.2.2 Limites du modèle de simulation

Plus précisément nous avons formulé un certain nombre d'hypothèses pour la simulation dont les principales sont de considérer un unique système autonome et un réseau « permanent ».

L'hypothèse d'un réseau considéré comme « permanent » peut être réductrice car on a considéré que les différents nœuds ont à disposition autant de moyens de transport que nécessaire pour transporter les conteneurs, même si aujourd'hui cette hypothèse n'est pas irréaliste compte tenu du marché du transport. Ainsi, pour une simulation plus précise, on pourrait considérer la gestion de flottes de moyens limités même si un tel objectif n'est pas simple dans la mesure où il est difficile de modéliser la réalité quotidienne des transporteurs.

Notre hypothèse de considérer uniquement un système autonome se justifie par la nature unisectorielle de nos flux. Dans une approche, où l'on considérerait des flux de plusieurs secteurs, il deviendrait nécessaire de travailler sur un modèle comprenant plusieurs Systèmes Autonomes (SA). On aurait aussi pu considérer que chacun des deux grands distributeurs que nous avons étudié, représentait chacun un SA et simuler dans ce cas un réseau PI avec deux SA. Un tel scénario aurait alors nécessité de définir les nœuds frontières et les protocoles de communication et d'échange de services entre ces deux SA.

D'autres hypothèses implicites ont été prises dans ce modèle de simulation, comme la capacité infinie des infrastructures routières et ferroviaires ou encore celle des hubs. Enfin la gestion du repositionnement des conteneurs vides est également un axe de recherche fort pour valider la pertinence du concept. Le raffinement de ces hypothèses augmenterait sans nul doute le réalisme des résultats en cas de besoin.

7.2.3 Limites de l'évaluation des coûts

La simulation nous a permis d'évaluer certains indicateurs de performance tels que les coûts ou les émissions de CO₂. Les différentes valeurs obtenues nous aident à comparer les scénarios entre eux et à évaluer les gains potentiels d'un changement d'organisation vers un réseau interconnecté de type PI. Les coûts présentés prennent en compte uniquement les coûts de fonctionnement, fondés sur des installations telles que nous les connaissons aujourd'hui. La faisabilité d'un tel projet PI nécessite l'étude des coûts d'investissement requis pour la construction des nouveaux sites logistiques (PI-hubs). Cette étude n'a pas été réalisée dans la mesure où ce concept est encore embryonnaire et qu'il est difficile de prévoir, à titre d'exemple, le coût des nouveaux moyens de manutention des différents conteneurs.

C'est ainsi que notre recherche ne prétend pas avoir toutes les clefs nécessaires à la mise en œuvre d'un Internet Physique mais plutôt une première contribution à sa définition, et à l'évaluation de ses performances potentielles. Les résultats obtenus sont encourageants et nous poussent à continuer vers cette voie de l'interconnexion des réseaux de prestations logistiques et de chercher donc à concrétiser ce nouveau concept.

7.3 Les perspectives de recherche : la concrétisation

Notre recherche représente un premier pas exploratoire vers l'interconnexion des réseaux logistiques. Cependant, plusieurs défis restent à relever. Dans ce paragraphe on présentera trois défis principaux : l'adhésion des prestataires, la mise en œuvre technologique et la mise en œuvre organisationnelle.

7.3.1 L'adhésion des parties prenantes au concept de l'Internet Physique

La première difficulté de la mise en œuvre d'un tel projet d'interconnexion des réseaux logistiques est sans doute l'adhésion d'un nombre minimum de partenaires. Il s'agit de convaincre en premier lieu les grands donneurs d'ordres industriels et ceux de la distribution dans l'ensemble des secteurs. On rappelle que le concept de PI, ou plus généralement celui de l'interconnexion des réseaux de prestations logistiques, est valable pour l'ensemble des domaines nécessitant un transport de marchandises.

L'adhésion de grands acteurs de la logistique est vitale pour la concrétisation de l'Internet Physique. En effet, leurs tailles et leurs actifs, peuvent leur permettre de se coordonner pour définir de nouvelles solutions logistiques : des standards. C'est ainsi que des efforts de communication seront nécessaires pour expliquer la démarche et recueillir leurs observations face à ce nouveau concept et ainsi faire évoluer les représentations et les définitions.

Cette thèse, en identifiant les gains potentiels obtenus sur des données réelles de la grande distribution française, peut servir de base à un argumentaire pour promouvoir la logique d'interconnexion des réseaux logistiques.

7.3.2 La mise en œuvre technologique

La mise en œuvre de l'Internet Physique nécessite l'utilisation de nouvelles technologies dont certaines sont encore inexistantes et d'autres sont au stade encore de pilote dans le domaine de la logistique. Voici une liste d'éléments pour lesquels il faudra trouver des solutions technologiques :

- Conteneurs : des solutions sont nécessaires afin de les définir, définir leurs outils de manutention, leur recyclage, etc.
- Sites logistiques : il faudra passer de sites « fermés » manipulant des palettes à des sites « ouverts » adaptés à des conteneurs. Ceci nécessite donc de développer des technologies adaptées au transbordement, au triage et au stockage de ces conteneurs.
- Systèmes d'information : l'Internet Physique repose sur le concept d'une interconnexion des réseaux logistiques, qui se traduit donc par un échange de flux d'informations en support des flux physiques. Tout au long de notre recherche nous avons utilisé ce partage d'informations et notamment lors de la détermination des chemins à emprunter. Il y a ici un champ complet à explorer en cas de développement du concept.
- Outils de la communication de l'information : Les systèmes d'informations traitent des données et les transmettent à différents acteurs, mais ils nécessitent des technologies sur le terrain qui font remonter ces données. Il s'agit par exemple des technologies de l'Internet des objets pour lesquels les chaînes logistiques apparaissent comme un domaine d'application majeur.
- Moyens de transport : ils devront s'accorder au contexte de l'Internet Physique que nous avons présenté. Pour cela, cette adaptation ne peut pas se résumer à définir des

gabarits des moyens de transport ajustés aux tailles des conteneurs. Il sera aussi nécessaire de les concevoir de façon à faciliter les échanges de flux en intégrant de nouvelles fonctions telle qu'une sélection plus facile des conteneurs à décharger évitant la manipulation de l'ensemble du chargement, à la manière d'un porte conteneur de taille réduite.

On s'aperçoit donc que la mise en œuvre de PI nécessite encore de nombreux développements technologiques. Le prochain paragraphe montre aussi les développements nécessaires au niveau organisationnel.

7.3.3 La mise en œuvre organisationnelle

L'interconnexion des réseaux logistiques actuellement dédiés est en soit un changement radical dans l'organisation des chaînes logistiques, qui nécessite de:

- Elaborer des contrats entre les différents acteurs afin de sécuriser les échanges de flux et d'informations et de les réglementer. Ces contrats permettront de fixer les droits et les devoirs de chacun (expéditeur, destinataire et prestataire logistique)
- Définir des structures au sein de l'entreprise capable d'interagir avec les autres acteurs du réseau PI et disposant des systèmes d'informations adéquats
- Définir les termes de valorisation des prestations effectuées par les acteurs du réseau PI. En effet, vu que les flux transitent entre différents prestataires, il faudra définir comment répartir la création de valeur entre chacun des acteurs. Cette question n'est pas simple à résoudre car différents paramètres entrent en jeu. Sa résolution nécessite de travailler sur les mécanismes de conception, de tarification et des modèles d'affaires.

Afin d'éclairer ces dimensions économique, technologique et organisationnelles, plusieurs programmes de recherche ont été lancés dans ce sens :

- Le projet européen Modulushca (qui regroupe 16 partenaires de différents pays, comme Procter & Gamble ou la Poste Italienne) dont le but principal est l'étude et l'expérimentation de l'interconnexion des réseaux de prestations logistiques via la conception et la définition de petits conteneurs adaptés aux produits de grande consommation

- Le projet 'Establishing the Logistics System Gain of the Physical Internet' qui viendra déterminer l'impact des dimensions de conteneurs standard sur la chaîne d'approvisionnement
- Le projet 'Designing Material Handling Systems and Facilities for the Physical Internet' qui étudie la conception des sites logistiques de l'Internet Physique (Montreuil et al. 2010).

Tout ceci montre bien la proportion qu'a pris ce nouveau concept de l'Internet Physique en particulier, et celui de l'interconnexion des réseaux logistiques en général, et donc le potentiel de recherche et d'application qui y est attaché.

Références

- ADEME (2007). Guide des facteurs d'émissions. Bilan carbone. Paris, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre.
- AFNOR (2005). Etude sur l'Intérêt d'une harmonisation des Unités de Chargement Intermodales pour développer le transport combiné européen. Ministère de l'Equipeement, des Transports, de l'Aménagement du territoire, du Tourisme et de la Mer.
- Ambrosino, D. and M. Grazia Scutella (2005). "Distribution network design: New problems and related models." European Journal of Operational Research 165(3): 610-624.
- Ballot, E. and F. Fontane (2008). "Transport performance and efficiency: Overall Vehicle Effectiveness." Transportation Research Part E: Logistics and Transportation (Review Under review since june 2008).
- Ballot, E., R. Glardon and B. Montreuil (2010). Rapport Open Fret: Contribution à la conceptualisation et à la réalisation d'un Hub Rail_Route de l'Internet Physique. M. C. 52, PREDIT: Programme de recherche et d'innovation dans les trasports terrestres.
- Ballot, E., O. Gobet and B. Montreuil (2012a). Physical Internet enabled open hub network design for distributed networked operations. Sevice orientation in holonic and multi-agent manuacturing control. T. Borangiu, A. Thomas and D. Trentesaux. Heidelberg, Springer. 402: 354.
- Ballot, E., B. Montreuil and F. Fontane (2011). Topology of Logistic Networks and the Potential of a Physical Internet. International Conference on Industrial Engineering and Systems Management IESM' 2011. Metz - France: 585-594.
- Ballot, E., R. Sarraj, S. Pan, F. Fontane, B. Montreuil, D. Hakimi, R. Glardon, M. Thémans and O. Gobet (2012b). Simulation de l'Internet Physique : Contribution à la simulation des enjeux et à sa définition, PREDIT: Programme de recherche et d'innovation dans les trasports terrestres.
- Bellman, R. (1958). "On a Routing Problem." Quarterly of Applied Mathematics 16(1): 87-90.
- Bernadet, M. (1997). Le Transport Routier de Marchandise: Fonctionnement et dysfonctionnements. Paris, Economica.
- Boissieu, C. d. (2006). Division par quatre des émissions de gaz à effet de serre de la France à l'horizon 2050. Paris, Ministère des Finances de l'Economie et de l'Industrie: 77p.
- Bondre, S. (2011). Mumbai's Dabbawala: The Uncommon Story of the Common Man, OMO Books.
- Bouley, C. (2010). Manifeste pour le 45' PALLETWIDE : Un conteneur vert pour l'Europe. Geodis Global Solutions.
- Burgess, K., P. J. Singh and R. Koroglu (2006). "Supply chain management; a structured literature review and implications for future research." International Journal of Operations & Production Managements 36(7): 703–729.
- Burns, L. D., R. W. Hall, D. E. Blumenfeld and C. F. Daganzo (1985). "Distribution Strategies that Minimize Transportation and Inventory Costs." Operations Research 33(3): 469-490.
- CaRL (2012). Innovative Seehafentechnologien II (ISETEC II). Germany, Confidential report - Siemens AG.
- CE (2006). Règlement (CE) No 561/2006 du parlement Européen et du Conseil du 15 mars 2006 relatif à l'harmonisation de certaines dispositions de la législation sociale dans le domaine des transports par route, modifiant les règlements (CEE) no 3821/85 et (CE)

- no 2135/98 du Conseil et abrogeant le règlement (CEE) no 3820/85 du Conseil. 561/2006. P. Européen. Strasbourg. 561/2006: 13.
- Cheung, R. K., J. H. Tong and B. Slack (2003). "The transition from freight consolidation to logistics: the case of Hong Kong." Journal of Transport Geography 11(4): 245-253.
- Chevalier, D. and F. Duphil (2004). Le transport, Foucher.
- Chopra, S. and P. Meindl (2004). Supply chain management: Strategy, planning and operation, Prentice Hall.
- Christopher, M. (2005). Logistics and supply chain management: creating value-adding networks, Pearson education.
- Cizault, G. (2002). IPv6: Théorie et pratique, O'reilly.
- Coffman Jr, E. G., M. R. Garey and D. S. Johnson (1996). Approximation algorithms for bin packing: A survey. Approximation algorithms for NP-hard problems PWS Publishing Co.: 46-93.
- Colin, J., G. Paché and M. Marchesnay (1988). La logistique de distribution: l'avenir du marketing, Chotard et associés.
- Comer, D. (2006). TCP/IP: Architecture, protocoles, et applications, Pearson.
- Commission Européenne (1998). Sur Les Transports et le CO2: Pour une approche communautaire. C. Européenne. Bruxelles, Office des publications officielles des Communautés européennes.
- Crujssens, F. (2012). Horizontal collaboration: a CO3 position paper: 66.
- Crujssens, F., M. Cools and W. Dullaert (2007a). "Horizontal cooperation in logistics: Opportunities and impediments." Transportation Research Part E 2007(43): 129-142.
- Crujssens, F., W. Dullaert and H. Fleuren (2007b). "Horizontal cooperation in transport and logistics: a literature review." Transportation journal 46(3): 22-39.
- Daganzo, C. F. (2005). Logistics systems analysis, Springer.
- Dechter, R. and J. Pearl (1985). "Generalized best-first search strategies and the optimality of A*." J. ACM 32(3): 505-536.
- Dejax, P. J. and T. G. Crainic (1987). "Survey Paper--A Review of Empty Flows and Fleet Management Models in Freight Transportation." Transportation Science 21(4): 227-248.
- DHL (2010). Delivering tomorrow towards sustainable logistics. Bonn, Germany, Deutsche Post DHL.
- DHL (2012). Delivering tomorrow Logistics 2050 a scenario study. Bonn, Germany, Deutsche Post DHL.
- Dijkstra, E. W. (1959). "A note on two problems in connexion with graphs." Numerische mathematik 1(1): 269-271.
- Dornier, P.-P. (1997). Recomposition de l'approche logistique dans le secteur des produits de grande diffusion: intégration fonctionnelle, intégration sectorielle, intégration géographique, Mines ParisTech.
- Duong, O. and M. Savy (2008). Prospective fret 2030. MEEDDAT, Paris: 208.
- European Commission (2011). A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. Brussels, Office of the European Union.
- EuroStat (2007). Average loads, distances and empty running in road freight transport - 2005. EuroStat, 1977-0316.
- Fontelle, J., N. Allemand and J. Chang (2003). Inventaire des émissions de polluants atmosphériques en France--Séries sectorielles et analyses étendues (format SECTEN), CITEPA.
- Francs, O. C. d. (2013). La grande distribution : un poids lourd secoué par la crise. Les Echos.
- Frémont, A. (2005). Conteneurisation et mondialisation. Les logiques des armements de lignes régulières, Université Panthéon-Sorbonne-Paris I.

- Fu, L., D. Sun and L. R. Rilett (2006). "Heuristic shortest path algorithms for transportation applications: state of the art." Computers & Operations Research 33(11): 3324-3343.
- Gilmore, P. C. and R. E. Gomory (1961). "A linear programming approach to the cutting-stock problem." Operations research: 849-859.
- Gilmore, P. C. and R. E. Gomory (1963). "A linear programming approach to the cutting stock problem-Part II." Operations research: 863-888.
- Hall, R. W. (1987). "Consolidation strategy: inventory, vehicles and terminals." Journal of Business Logistics Volume 8, Number 2.
- Hardy, D., G. Malléus and J. N. Méreur (2002). Réseaux: Internet, téléphonie, multimédia, Springer.
- Harrison, A. and R. v. Hoek (2005). Logistics Management and Strategy, Prentice Hall.
- Hickman, J., D. Hassel, R. Joumard, Z. Samaras and S. Sorenson (1999). Methodology for calculating transport emissions and energy consumption (Report for Project MEET), European Commission/DG VII.
- Huitema, C. (1999). Routing in the Internet, PrenticeHall.
- Initiative, E. G. C. (2010). Multi-annual roadmap and long-term strategy.
- INRIA. (2011). "Institut National de Recherche en Informatique et Automatique, Interstices." from http://interstices.info/jcms/c_15921/internet-le-conglomerat-des-reseaux?part=0.
- Johnson, D. S., A. Demers, J. D. Ullman, M. R. Garey and R. L. Graham (1974). "Worst-case performance bounds for simple one-dimensional packing algorithms." SIAM Journal on Computing 3: 299.
- Jorgensen, M. W. and S. C. Sorenson (1998). Estimating emissions from railway traffic (Report for the Project MEET).
- Joumard, R. (1999). Methods of estimation of atmospheric emissions from transport: European scientist network and scientific state-of-the art COST 319 final report. Bron, INRETS: 158.
- Kamakaté, F. and L. Schipper (2009). "Trends in truck freight energy use and carbon emissions in selected OECD countries from 1973 to 2005." Energy Policy 37(10): 3743-3751.
- Kellerer, H., U. Pferschy and D. Pisinger (2004). Knapsack Problems, Springer.
- Lambert, D. M. and M. C. Cooper (2000). "Issues in Supply Chain Management." Industrial Marketing Management 29(1): 65-83.
- Leglise, M. (2007). La Logistique en France: évolutions et enjeux, Ministère de l'écologie du développement durable et de l'aménagement durables.
- Levinson, M. (2008). The box: how the shipping container made the world smaller and the world economy bigger, Princeton University Press.
- Mariotte, H. (2007). "L'emploi dans la fonction logistique en France." Notes de synthèse du SESP SESP en bref n°16
- Mathon, P. (2003). Windows Server 2003: les services réseaux TCP/IP, Editions ENI.
- McKinnon, A. (2000). "Sustainable distribution: opportunities to improve vehicle loading." UNEP Industry and Environment (Dec): 26-30.
- McKinnon, A. (2010). European Freight Transport Statistics: Limitations, Misinterpretations and Aspirations. 5th ACEA Scientific advisory group meeting. ACEA. Bruxelles.
- McKinnon, A., Y. Ge and D. Leuchars (2003). Analysis of Transport Efficiency in the UK Food Supply Chain. L. R. C. o. H.-W. University. Edinburgh: 38.
- MEEDDAT (2010). La logistique - Tour d'horizon. Ministère de l'écologie de l'énergie du développement durable des transports et du logement.
- MEEDDAT (2011). Les comptes des transports en 2010. Ministère de l'écologie de l'énergie du développement durable des transports et du logement.

- Meller, R. D., Y.-H. Lin and K. P. Ellis (2012). The Impact of Standardized Metric Physical Internet Containers on the Shipping Volume of Manufacturers. 14th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, INCOM'12, Bucharest.
- Mentzer, J. T., W. DeWitt, J. S. Keebler, S. Min, N. W. Nix, C. D. Smith and Z. G. Zacharia (2001). "Defining Supply Chain Management." Journal of Business Logistics Vol.22, No. 2, .
- Michel, C. (2005). Gestion des stocks et de la distribution.
- Min, H. and G. Zhou (2002). "Supply chain modeling: past, present and future." Computers & Industrial Engineering 43(1): 231-249.
- Montreuil, B. (2009). "Physical Internet Manifesto: globally transforming the way physical objects are handled, moved, stored, realized, supplied and used." from www.physicalInternetInitiative.org.
- Montreuil, B. (2010). Physical Internet Manifesto V1. 7: globally transforming the way physical objects are handled, moved, stored, realized, supplied and used [Online]. Québec, CA.
- Montreuil, B., R. D. Meller and E. Ballot (2010). Towards a Physical Internet : the impact on logistics facilities and material handling systems design and innovation. Progress in Material Handling Research. K. G. e. al., Material Handling Industry of America: 23.
- Naesens, K., L. Gelders and L. Pintelon (2009). "A swift response framework for measuring the strategic fit for a horizontal collaborative initiative." International Journal of Production Economics 121(2): 550-561.
- Nozick, L. K. and M. A. Turnquist (1998). "Integrating inventory impacts into a fixed-charge model for locating distribution centers." Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review 34(3): 173-186.
- Nozick, L. K. and M. A. Turnquist (2001). "Inventory, transportation, service quality and the location of distribution centers." European Journal of Operational Research 129(2): 362-371.
- O'Cearbhaill, E. A. and M. O'Mahony (2005). "Parallel implementation of a transportation network model." Journal of parallel and distributed computing 65(1): 1-14.
- OECD (2007). "Cutting Transport CO2 Emissions: What Progress ?".
- Paganelli, P., V. Charalampos, E. Cornelisse, A. Damentka, M. Forcolin, M. Jermol, R. Styczynski, W. Szczurek and D. Vedovato (2009). Euridice Project White paper.
- Pan, S. (2010). Contribution à la définition et à l'évaluation de la mutualisation de chaînes logistiques pour réduire les émissions de CO2 du transport : application au cas de la grande distribution. Doctorat Ph.D., Mines ParisTech.
- Pan, S., E. Ballot and F. Fontane (2011). "The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains." International Journal of Production Economics In Press, Accepted Manuscript.
- Patier, D. (2002). La logistique dans le ville. Paris, CELSE.
- Piecyk, M. I. and A. C. McKinnon (2010). "Forecasting the carbon footprint of road freight transport in 2020." International Journal of Production Economics 128(1): 31-42.
- Pimor, Y. (2001). "Logistique: techniques et mise en œuvre."
- Pimor, Y. and M. Fender (2008). Logistique: Production, Distribution, Soutien. DUNOD.
- PIPAME et CNAM (2009). Logistique mutualisée : la filière « fruits et légumes » du Marché d'Intérêt National de Rungis. M. d. l'économie. Paris, Pôle interministériel de prospective et d'anticipation des mutations économiques et Conservatoire National des Arts et Métiers.
- Pooley, J. and A. J. Stenger (1992). "Modeling and evaluation shipment consolidation in a logistics system." JOURNAL OF BUSINESS LOGISTICS Vol.13, No. 2.
- Pujolle, G., O. Salvatori and J. Nozick (2008). Les réseaux, Eyrolles.

- Rahoual, M. and P. Siarry (2006). Réseaux informatiques: conception et optimisation, Editions TECHNIP.
- Raux, C. (2007). "Réduire les émissions de CO2 dans le transport: un marché de permis pour les automobilistes et le fret." Transports(445).
- Rognon, J.-L. (2009). "Retour d'expérience CARREFOUR : Des CCC pour tendre les flux de produits secs." Supply Chain Magazine(40): 22-24.
- Roux, M. and T. Liu (2003). Optimisez Votre Plate-Forme Logistique. Paris, Editions d'Organisation.
- Sallez, Y., T. Berger and D. Trentesaux (2009). "A stigmergic approach for dynamic routing of active products in FMS." Computers in Industry 60(3): 204-216.
- Sarraj, R., E. Ballot and S. Pan (2011). "Analogies entre réseau Internet et réseaux de prestations logistiques." Congrès International de Génie Industriel-CIGI 2011.
- Sarraj, R., E. Ballot and S. Pan (2012a). "Potential of routing protocols for freight in open logistics networks: the case of FMCG in France." .
- Sarraj, R., E. Ballot, S. Pan and D. Hakimi (2012b). "Analogies between Internet network and logistics service networks: challenges involved in the interconnection." Journal of Intelligent Manufacturing.
- Sarraj, R., E. Ballot, S. Pan, D. Hakimi and B. Montreuil (2013). "Efficiency potential of interconnection of logistics networks " International Journal of Production Research - Under review.
- Savy (2010). Le fret mondial et le changement climatique. Centre d'analyse stratégique.
- Schumacher, J., M. Rieder, M. Gschweidl and P. Masser (2011). Intelligent Cargo–Using Internet of Things Concepts to Provide High Interoperability for Logistics Systems. Architecting the Internet of Things, Springer: 317-347.
- Serveau, L. t. (2011). Inventaire des émissions de polluants dans l'atmosphère en France. SECTEN. Paris, Citepa.
- Servin, C. (2003). Réseaux et télécoms.
- Sétra (2008a). La logistique de la grande distribution. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire.
- Sétra (2008b). Transport de marchandises palettisées. Ministère de l'écologie, de l'énergie, du développement durable et de l'aménagement du territoire.
- Sétra (2012). La logistique tour d'horizon. Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement.
- Simchi-Levi, D. (1994). "New worst-case results for the bin-packing problem." Naval Research Logistics 41(4): 579.
- Stadtler, H. and C. Kilger (2000). Supply chain management and advanced planning: concepts, models, software and Case Studies. Berlin, Springer.
- Stevens, W. R. (1993). TCP/IP Illustrated, Volume 1, The Protocols.
- Swaminathan, J. M., S. F. Smith and N. M. Sadeh (1998). "Modeling Supply Chain Dynamics: A Multiagent Approach*." Decision Sciences 29(3): 607-632.
- Tanenbaum, A. (2003). Réseaux, Pearson Education.
- Tarteret, O. and H. Hanne (2012). Grande distribution et croissance économique en France. Direction Générale de la Concurrence, de la Consommation et de la Répression des Fraudes.
- Teissier, O. and L. Meunier (2008). "Scénarios de forte reduction des emissions de gaz à effet de serre dans les transports et les bâtiments à l'horizon 2050." Notes de synthèse du SESP(170): 5-15.
- Theodor, B., T. André and T. Damien (2013). Service Orientation in Holonic and Multi-Agent Manufacturing and Robotics.

- Thierry, C., A. Thomas and G. Bel (2008). Simulation for supply chain management, ISTE and John Wiley & Sons.
- Toutain, L. (1996). Réseaux locaux et Internet: des protocoles à l'interconnexion, Hermès.
- Tyan, J. C., F.-K. Wang and T. C. Du (2003). "An evaluation of freight consolidation policies in global third party logistics." Omega 31(1): 55-62.
- UNIZA (2008). Intelligent MegaSwapBoxes for Advanced Intermodal Freight Transport. FP7.
- Vaidyanathan, G. (2005). "A framework for evaluating third-party logistics." Communications of the ACM 48(1): 89-94.
- VNF (2009). Guide du transport fluvial. Voies navigables de France, Editions de la navigation du Rhin.
- Zäpfel, G. and M. Wasner (2002). "Planning and optimization of hub-and-spoke transportation networks of cooperative third-party logistics providers." International Journal of Production Economics 78(2): 207-220.

Chapitre 8 : Annexes

Annexe 1: Réseau ferroviaire considéré	237
Annexe 2 : Valeurs par défaut des paramétrages de la simulation.....	239
Annexe 3 : Exemple de résultats de la simulation	244

Chapitre 8. **Annexes**

Annexe 1: Réseau ferroviaire considéré

Le réseau ferroviaire provient de la même base IGN Route 120®. Cependant entre les gares de marchandises déclarées et la réalité des infrastructures exploitables pour des trafics de marchandises conteneurisées et multimodal il existe une différence significative. En conséquence, nous avons filtré la base IGN avec les données de la Figure 81 qui représente les gares utilisées.

NOM GARE MARCHANDISE	CODE POSTAL	TERMINAL TRANSPORT COMBINE	LATITUDE	LONGITUDE	LIAISON 1	LIAISON 2	LIAISON 3	LIAISON 4	LIAISON 5	LIAISON 6
AMBEREU	1500		45,95	5,2833	VENISSIEUX	MACON	GRENOBLE	DIJON		
AMIENS	80000		49,9	2,3	DOURGES	DUNKERQUE	LE BOURGET	REIMS	SOTTEVILLE	
AVIGNON	84000	OUI	43,9483	4,8089	MIRAMAS	BEZIERS	BADAN GIOVRS VILLE	GRENOBLE		
BADAN GIOVRS VILLE	69520		45,6167	4,7833	VENISSIEUX	SAINT ETIENNE CHATEAUCREUX	AVIGNON	GRENOBLE		
BEZIERS	34500	OUI	43,4018	3,6966	AVIGNON	MIRAMAS	TOULOUSE ST JORY	ISSOIRE	PERPIGNAN	
BRETAGNY	91220		48,6167	2,3167	FLEURY LES AUBRAIS	JUVISY				
CAEN	14000		49,1859	-0,3591	SOTTEVILLE	LE MANS	GENNEVILLIERS			
CANNES	6150		43,5513	7,0128	MARSEILLE CANET					
CHAGNY	71150		46,9108	4,75333	GEVREY	NEVERS	MACON			
CLERMONT - FERRAND	63000	OUI	45,7833	3,0833	RIOM	ISSOIRE	SAINT ETIENNE CHATEAUCREUX	LIMOGES		
COGNAC	16100	OUI	45,7	-0,35	HOUCADE	POITIERS				
DIJON	21000		47,3167	5,0167	NANCY CHAMPAGNEULLES	MULHOUSE NORD	GEVREY	AMBEREU	JUVISY	VALENTON
DOURGES	62119	OUI	50,4333	2,9833	SOMAIN	DUNKERQUE	LE BOURGET			
DUNKERQUE	59140		51,05	2,3667	SOMAIN	DOURGES	AMIENS			
EPINAL	88000		48,2333	6,55	NANCY CHAMPAGNEULLES	MULHOUSE NORD				
FLEURY LES AUBRAIS	45400	OUI	47,9667	1,9667	SAINT PIERRE DES CORPS	VIERZON	BRETIGNY	CAEN		
GENNEVILLIERS	95100		48,95	2,25	SOTTEVILLE	VERSAILLES CHANTIER	LE BOURGET			
GEVREY	21220	OUI	47,2333	4,9	DIJON	CHAGNY				
GRENOBLE	38000		45,1667	5,7167	AVIGNON	AMBEREU	SAINT JEAN DE MAURENNE			
HAUSBERGEN	67200		48,5834	7,743	WOIPPY	MULHOUSE NORD	NANCY CHAMPAGNEULLES			
HENDAVE	64700	OUI	43,35	-1,75	HOUCADE					
HOUCADE	33130		44,8	-0,5333	HENDAVE	TOULOUSE ST JORY	COGNAC			
ISSOIRE	63500		45,55	3,25	BEZIERS					
JUVISY	91260		48,693	2,377	BRETIGNY	VERSAILLES CHANTIER	DIJON	VALENTON		
LA ROCHELLE	17000		46,1667	-1,15	POITIERS					
LE BOURGET	93350		48,9341	2,4358	GENNEVILLIERS	NOISY LE SEC	AMIENS	DOURGES		
LE HAVRE PLAINE	76600	OUI	49,4938	0,1077	SOTTEVILLE	VERSAILLES CHANTIER	SAINT PIERRE DES CORPS	CAEN		
LE MANS	72000		48	0,2	RENNES	TOULOUSE ST JORY	CLERMONT-FERRAND			
LIMOGES	87000		45,8315	1,2578	VIERZON	VENISSIEUX	AMBEREU			
MACON	71000		46,35	4,8333	CHAGNY	MIRAMAS				
MARSEILLE CANET	13001	OUI	43,2981	5,3841	CANNES	AVIGNON	BEZIERS			
MIRAMAS	13140	OUI	43,5833	5	MARSEILLE CANET	HAUSBERGEN	EPINAL			
MULHOUSE NORD	68100		47,75	7,3333	DIJON	HAUSBERGEN	DIJON	EPINAL	REIMS	
NANCY CHAMPAGNEULLES	54000	OUI	48,6833	6,2	WOIPPY	SAINT PIERRE DES CORPS				
NANTES	44000		47,2173	-1,5534	RENNES	CHAGNY	RIOM			
NEVERS	58000		46,9497	3,1481	VIERZON	LE BOURGET	VALENTON			
NOISY-LE SEC	93130	OUI	48,8915	2,4645	REIMS					
PERPIGNAN	66100	OUI	42,6976	2,8954	BEZIERS					
POITIERS	86000		46,5833	0,3333	SAINT PIERRE DES CORPS	HOUCADE	LA ROCHELLE			
REIMS	51100		49,25	4,0333	NOISY LE SEC	AMIENS	NANCY CHAMPAGNEULLES	WOIPPY		
RENNES	35700	OUI	48,0833	-1,6833	NANTES	LE MANS				
RIOM	63200		45,95	3,1333	CLERMONT-FERRAND	NEVERS				
SAINT ETIENNE CHATEAUCREUX	42100		45,4333	4,4333	CLERMONT-FERRAND	BADAN GIOVRS VILLE				
SAINT JEAN DE MAURENNE	73300		45,25	6,2833	GRENOBLE					
SAINT PIERRE DES CORPS	37300	OUI	47,3522	0,6691	LE MANS	VIERZON	NANTES	LIMOGES	FLEURY LES AUBRAIS	
SOMAIN	59490		50,3667	3,2833	DOURGES	DUNKERQUE	WOIPPY			
SOTTEVILLE	76300		49,4097	1,0901	LE HAVRE	GENNEVILLIERS	CAEN	AMIENS		
TOULOUSE ST JORY	31790	OUI	43,7415	1,3709	LIMOGES	HOUCADE	BEZIERS			
VALENTON	94460	OUI	48,7667	2,45	JUVISY	NOISY LE SEC	DIJON			
VENISSIEUX	69200	OUI	45,6833	4,8833	MACON	BADAN GIOVRS VILLE	AMBEREU			
VERSAILLES CHANTIER	78000		48,8	2,1333	LE MANS	JUVISY	GENNEVILLIERS			
VIERZON	18100		47,2561	1,9557	FLEURY LES AUBRAIS	SAINT PIERRE DES CORPS	LIMOGES	NEVERS		
WOIPPY	57140		49,15	6,15	HAUSBERGEN	SOMAIN	NANCY CHAMPAGNEULLES	REIMS		

Figure 81: Liste des terminaux multimodaux utilisés

Annexe 2 : Valeurs par défaut des paramétrages de la simulation

La simulation a été évaluée avec des valeurs qui sont données dans le Tableau 22. Ces valeurs peuvent naturellement être ajustées en fonction des circonstances.

Tableau 22: Paramétrages par défaut du modèle et de sa valorisation

No	Coefficient	Valeur
1	Coût unitaire de transport routier	76,032 m ³
2	Capacité de camion en poids	25 tonnes
3	Capacité de train en volume (équivalent à 6 camions)	456,192 m ³
4	Unit cost of road transport (full truck)	1€/km + 0.95€/l de diesel ¹³
5	Coût unitaire de transport ferroviaire en train complet	40€/km ¹³
6	Coût Entrée ou Sortie pour stockage	10€/conteneur ¹⁴ , 1€/ palette
7	Coût unitaire de manutention (chargement ou déchargement)	<u>Pour un conteneur</u> : 5€/ mouvement + 3.3* Longueur € ¹⁴ . <u>Pour une palette</u> : 2€
8	Coût de stockage unitaire	0.11€/m ³ /jour ¹⁵
9	Taux d'immobilisation	7.89 % / an ¹⁵
10	Coût de location de conteneur / jour ¹⁴	1,8 + 0,35*Longueur €/jour
11	Durée de location de conteneur /prestation	4 jours
12	Energie unitaire consommée par train électrique	0,022 kWh/t-km ¹⁶

¹³Pan, S. (2010). Contribution à la définition et à l'évaluation de la mutualisation de chaînes logistiques pour réduire les émissions de CO2 du transport : application au cas de la grande distribution. Doctorat Ph.D., Mines ParisTech.

¹⁴Calculée à partir des valeurs des conteneurs maritimes (20 'et 40'). Ce sont des valeurs approximatives, mais elles ont été amplifiées afin de s'assurer du potentiel de l'Internet Physique, et de donner de la crédibilité aux résultats.

¹⁵ Données FEEF : Fédération des Entreprises et Entrepreneurs de France.

¹⁶ Rapport Bilan Carbone ADEME (2007). Guide des facteurs d'émissions. Bilan carbone. Paris, Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie, Mission Interministérielle de l'Effet de Serre.

No	Coefficient	Valeur
13	Facteur d'émission d'un train	$0,0035 \cdot x \text{ kg CO}_2/\text{km}^{17}$ x: poids du camion (tonnes)
14	Facteur d'émission d'un camion	$(0,772+0,013 \cdot x) \text{ kg CO}_2/\text{km}^{18}$. x: poids du train (tonnes)
15	Temps de séjour minimum dans un hub (Chargement/déchargement, tris, mouvements, etc.) pour un conteneur.	60 minutes

Ces paramétrages de la simulation ont permis de mesurer des indicateurs de performances, présentés dans le Tableau 18. Nous présentons ici les définitions de ces indicateurs :

1. Coût logistique global : somme des coûts d'énergies (gasoil), de moyens de transport (camion, train), de manutentions (Pi-conteneurs, palettes), de transits, entrées/sorties des stocks, de stockage et de location des Pi-conteneurs.
2. Indicateurs sur les PI-conteneurs
 - a. Temps en stock par type de PI-conteneur : temps de séjour à un point de rupture de charge par type de PI-conteneur, avec pour objectif de calculer le coût de stock ($\text{€}/\text{m}^3 \cdot \text{jour}$) ;
 - b. Nombre d'entrées et de sorties de stock par type PI-conteneur avec pour objectif de calculer le coût lié au stock ($\text{€}/\text{type pi-conteneur}$) ;
 - c. Nombre de manutention par type PI-conteneur avec pour objectif de calculer le coût pour un déchargement et pour un chargement d'un PI-conteneur sur un moyen de transport ($\text{€}/\text{type PI-conteneur}$) ;
3. Nombre de transits (camions) avec pour objectif de calculer le coût de passage dans un hub. Un camion est en transit à un hub si aucun chargement/déchargement de conteneur n'est effectué sur le camion (sans ouvrir le conteneur de camion).
4. Energie consommée pour les opérations de transport qui est proportionnelle au km ou à la tonne-km selon le mode routier ou le mode ferroviaire. Pour les trains électriques, le facteur de consommation d'énergie est de $0,022 \text{ kWh/t-km}$ en France.
Pour les camions, la fonction de calcul du nombre de litres de diesel consommé est :

¹⁷ $=0,022 \text{ kWh/t-km} \cdot 0,045 \text{ kg CO}_2/\text{kWh}$ (taux français) = $0,001 \text{ kg CO}_2 / \text{t-km}$, mais pour un train il faut compter le poids net de locomotive et de wagons, donc $0,0035$

¹⁸Pan, S. (2010). Contribution à la définition et à l'évaluation de la mutualisation de chaînes logistiques pour réduire les émissions de CO₂ du transport : application au cas de la grande distribution. Doctorat Ph.D., Mines ParisTech.Exemple de camion complet de 25 tonnes : $0,772+0,013 \cdot 25 = 1,097 \text{ kg CO}_2/\text{km}$.

$(0,297+0,005*\text{charge du camion en tonne})*\text{distance parcourue}$.

Nota bene : L'énergie consommée est exprimée en kWh, en considérant que 1 litre de diesel est équivalent à 10,89 kWh.

5. Emissions de CO₂ qui représentent la somme des émissions de CO₂ dues aux transports (en Kg équivalent Carbone). Pour les trains électriques le facteur d'émission est de 0,0035 kg CO₂/t-km en France.
Pour les camions, la fonction de calcul des émissions de CO₂ est :
 $(0,772+0,013*\text{charge du camion en tonne})*\text{distance}$.
6. Nombre de hubs actifs, à savoir le nombre de hubs dans le PI-réseau utilisés dans la simulation.
7. Nombre de segment dans les trajets des PI-conteneur, ce qui permet d'analyser le nombre de détours (nombre de segments moyens, maxi, mini). Sur un trajet, le nombre de hubs intermédiaires = nombre de segments-1.
8. Kilomètres parcourus (route et rail).
9. Nombre de pauses et de nuitées (route). Si le temps de conduite est supérieur à 4.5 heures, une pause de 45 minutes est imposée sur le trajet. Idem, si le temps de conduite est supérieur à 9 heures, on doit ajouter une nuit sur le trajet. Cet indicateur n'est applicable que sur les trajets routiers.
10. Transport
 - a. Part réalisée par mode de transport exprimée en tonne-km

$$\text{Camion} = \sum_{\text{segment}} \sum_{\text{camion}} (\text{poids} * \text{distance réalisée du camion du segment})$$

$$\text{Train} = \sum_{\text{segment}} \sum_{\text{train}} (\text{poids} * \text{distance réalisée du train du segment})$$
 - b. Part du report modal : la part de transport ferroviaire sur le transport total (celui de 10.a)
11. Lead time (par conteneur), à savoir le temps de transport d'un PI-conteneur d'un point source à un point de destination (temps en route, temps de passage par un hub...). On peut regarder la valeur moyenne, maxi et mini.
12. Taux de chargement des moyens de transport ou PI-conteneur :
 - a. Taux de chargement (poids et volume) d'un moyen de transport (camion et train) en marchandises
 - b. Taux de remplissage (volume) des PI-conteneurs
 - c. Taux de chargement (poids et volume) d'un moyen de transport (camion et train) en PI-conteneurs

Nota bene : comme la capacité en poids d'un PI-conteneur n'est pas définie, on ne calcule pas le taux d'utilisation en poids pour les PI-conteneurs.
13. Temps de passage par hub par PI-conteneur, à savoir la somme des temps de manutention, de tri et d'attente d'un camion pour une expédition. On calcule le temps moyen, maxi et mini par PI-conteneur.

14. Taux de PI-conteneurs sans retard avec pour objectif d'évaluer le taux de service aux clients.
15. Nombre de trajets réalisés (route et rail). Pour le transport routier, un trajet peut être segmenté par des transits. En particulier, dans le modèle on ne prend pas en compte la tournée de véhicules (multi-pick ou multi-drop).
16. Poids transportés (route et rail), à savoir la somme des poids transportés dans le PI-réseau exprimé en tonnes.
17. Volumes transportés (route et rail), logique identique au point 17 mais exprimé en m^3 .
18. Liens actifs (route et rail), à savoir les liaisons du PI-réseau qui sont mises en service dans la simulation, avec pour objectif d'identifier les liaisons non utilisées dans le réseau.
19. Nombre de PI-conteneurs utilisés par type avec pour objectif de calculer le coût de location des PI-conteneurs.

Annexe 3 : Exemple de résultats de la simulation

Le Tableau 23 donne un aperçu des résultats obtenus à la suite de la simulation du scénario 2.3.C, et le Tableau 24 représente les coûts d'immobilisation et de possession des stocks de cycle et de sécurité obtenus pour ce même scénario.

Les Figure 82 et Figure 83 représentent des statistiques sur les flux journaliers traités par les PI-hubs routiers et multimodaux du scénario 2.3.C.

Tableau 23: Aperçu des résultats obtenus à la suite de la simulation du scénario 2.3.C

Indicateur	Unité de chargement: Pal/Conteneur	Unité	Somme	Moy	Maxi	Mini
Nombre d'entrées pour stock par type conteneur	Pal	#	734 141			
	T1: 1.2 m	#	479			
	T2: 2.4 m	#	552			
	T3: 3.6 m	#	487			
	T4: 4.8 m	#	615			
	T5: 6 m	#	853			
	T6: 12 m	#	20 867			
	T7: 3 m	#	0			
Nombre de sorties pour stock par type conteneur	Pal	#	726 713			
	T1: 1.2 m	#	3 008			
	T2: 2.4 m	#	2 207			
	T3: 3.6 m	#	2 456			
	T4: 4.8 m	#	2 012			
	T5: 6 m	#	2 144			
	T6: 12 m	#	19 247			
	T7: 3 m	#	0			
Nombre de manutention par type conteneur	Pal	#	0			
	T1: 1.2 m	#	27 764			
	T2: 2.4 m	#	23 178			
	T3: 3.6 m	#	19 548			
	T4: 4.8 m	#	14 838			
	T5: 6 m	#	14 947			
	T6: 12 m	#	168 272			
	T7: 3 m	#	0			
Nombre de camion en transit		#	138			
Energie consommée		kWh	12 736 951			
Energie consommée en route		L	11 091 742			
Energie consommée en rail		kWh	6 580 474			
Total Emissions CO ₂		kg CO ₂	29 879 687			
Emissions CO ₂ en route		kg CO ₂	28 832 793			
Emissions CO ₂ en rail		kg CO ₂	1 046 894			
Nombre de hubs actifs		#	47			
Nombre de segments		#	386 639	3,28	8	2
Km parcourus - route		km	28 675 906			
Km parcourus - rail		km	2 245 845			
Nombre de pauses (45mins)		#	6 034			
Nombre de nuitées		#	0			

Indicateur	Unité de chargement: Pal/Conteneur	Unité	Somme	Moy	Maxi	Mini
Total Transport		t.km	814 111 957			
Transport en route		t.km	514 999 488			
Transport en rail		t.km	299 112 469			
Part de report modal		%	36,74%			
Temps de livraison		H	-	8,73	42,25	0,75
Taux de chargement global - Camion	Poids	%	-	72%	100%	<1%
	Volume	%	-	54%	100%	<1%
Taux de remplissage moyen des conteneurs	Poids	%	-	-	-	-
	Volume	%	-	72%	100%	<1%
Taux de chargement en conteneurs	Poids	%	-	72%	100%	<1%
	Volume	%	-	75%	100%	9%
Taux de chargement global - Train	Poids	%	-	-	-	-
	Volume	%	-	71%	100%	44%
Taux de remplissage moyen des conteneurs	Poids	%	-	-	-	-
	Volume	%	-	73%	100%	<1%
Taux de chargement en conteneurs	Poids	%	-	-	-	-
	Volume	%	-	95%	100%	80%
Temps d'attente dans les hubs		H	524 955	1,97	5,98	0
Conteneurs sans retard (arrivés en 48H)		%	100,00%			
Nombre de trajets en camion		#	261 086			
Nombre de trajets en train		#	9 419			
Somme du poids transporté		t	6 086 606			
Somme du poids transporté - route		t	4 833 723			
Somme du poids transporté - rail		t	1 252 883			
Somme du volume transporté		m3	1444794			
Somme du volume transporté par route		m3	11 394 128			
Somme du volume transporté par rail		m3	3 053 786			
Link (Origine-Destination)		#	1 509			
Link de route		#	1 444			
Link de rail		#	65			
nbr Pal/Conteneur par Type	Pal	#	0			
	T1: 1.2 m	#	11 572			
	T2: 2.4 m	#	9 569			
	T3: 3.6 m	#	8 215			
	T4: 4.8 m	#	6 333			
	T5: 6 m	#	6 337			
	T6: 12 m	#	75 786			
	T7: 3 m	#	0			

Tableau 24: Coûts d’immobilisation et de possessions des stocks de cycle et de sécurité - Sc

2.3.C

	Usine (SC ¹⁹)	WH (SC)	WH (SS ²⁰)	Somme
Cout de stockage	1 206 218 €	1 222 463 €	750 633 €	3 179 314 €
Cout d'immobilisation	5 711 405 €	13 442 080 €	6 936 317 €	26 089 802 €
Somme	6 917 622 €	14 664 543 €	7 686 951 €	29 269 116 €

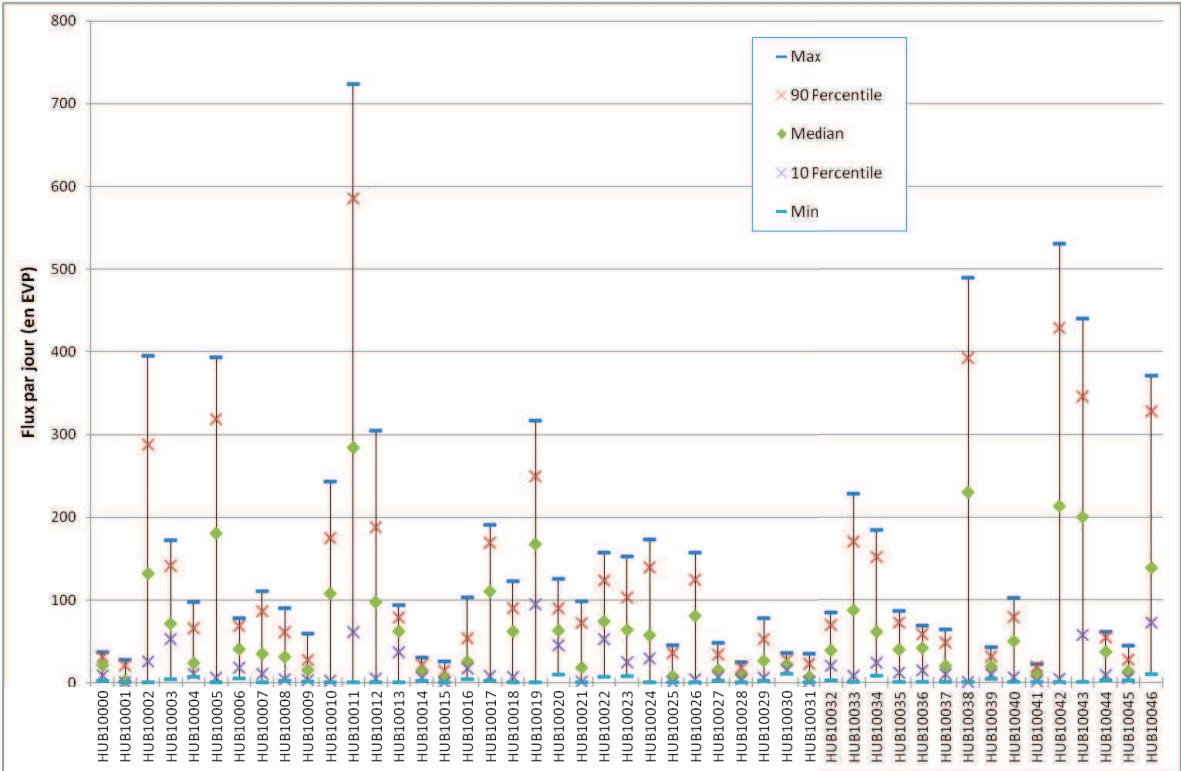


Figure 82 : Flux journaliers traités par les hubs routiers du Scénario 2.3.C

¹⁹ SC : Stock de Cycle

²⁰ SS : Stock de Sécurité

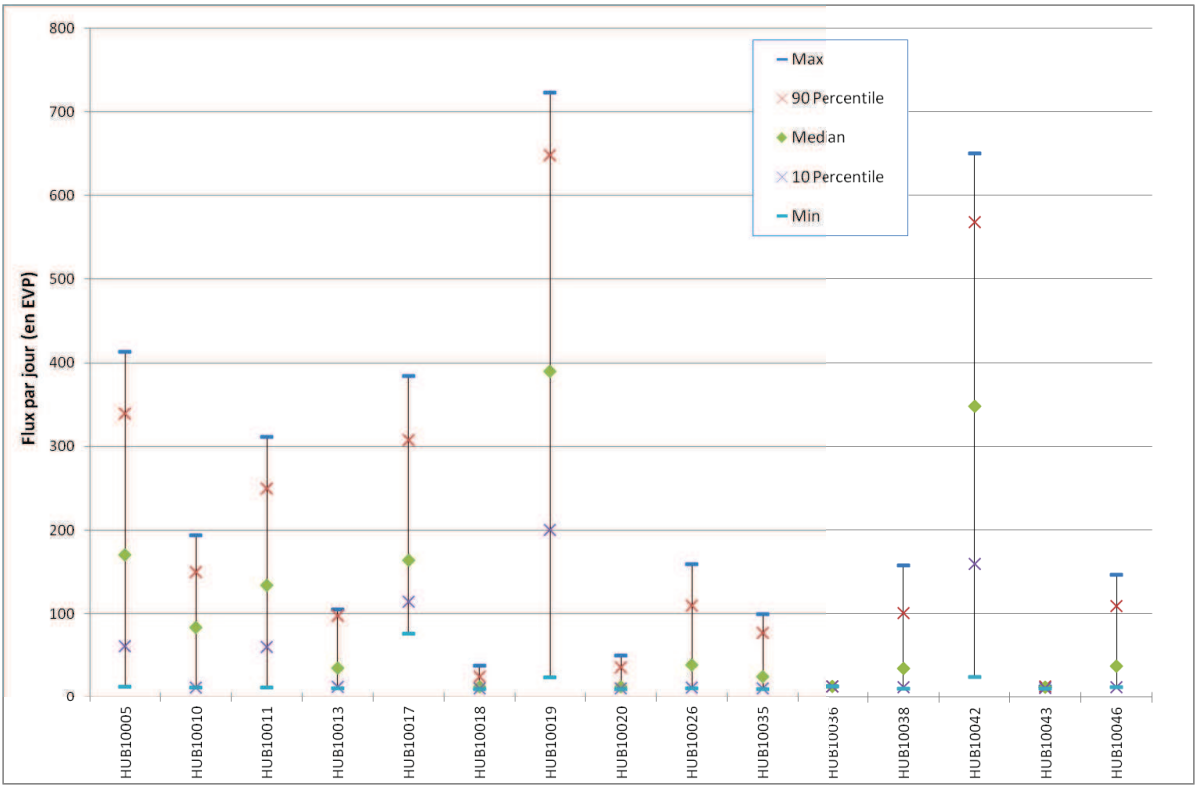


Figure 83 : Flux journaliers traités par les hubs multimodaux du Scénario 2.3.C

Interconnexion des réseaux logistiques: éléments de définition et potentiel

RESUME : Les réseaux logistiques et les prestations qui y sont associées mobilisent des moyens de transport et de stockage pour répondre aux demandes des acteurs des chaînes logistiques. Toutefois, ces réseaux très majoritairement dédiés à un acteur et sont dès lors très peu interconnectés entre eux. De cette fragmentation résulte une difficulté de consolidation des flux et donc un manque d'efficacité. Pour faire face à l'antagonisme croissant entre le besoin en fret atomisé et l'objectif de la Commission Européenne de réduire drastiquement les émissions de CO₂, une amélioration majeure dans la structure des réseaux logistiques est recherchée. On propose à ce titre d'interconnecter les réseaux logistiques comme l'a fait l'Internet Digital pour les réseaux informatiques. Le premier objectif de la thèse est de contribuer à la définition des premiers éléments clefs nécessaires à l'interconnexion des réseaux logistiques. A cette fin, cette thèse explicite, d'une part, les analogies possibles avec le monde des réseaux informatiques, et, d'autre part, caractérise les transpositions réalisables aux réseaux logistiques. En effet, comme cette thèse le montre, il existe de fortes similitudes entre ces réseaux, en dépit de différences fondamentales dans la nature des objets qui y sont mouvementés. Au-delà des concepts de l'Internet Physique et des méthodes proposées, aucune démonstration du potentiel de l'interconnexion des réseaux logistiques n'a encore été réalisée. C'est précisément le second objectif de ce travail que d'évaluer les enjeux à cette approche. Pour ce faire des flux réels de la grande consommation en France ont été traités avec différents protocoles de transport et suivants plusieurs scénarios, révélant des résultats encourageants avec des gains en émissions de CO₂, coûts, etc. S'agissant d'un premier travail dans ce domaine de l'interconnexion des réseaux logistiques, le modèle de simulation fournit de nombreuses nouvelles pistes de recherche.

Mots clés : Protocoles de transport, Interconnexion, Réseaux logistiques ouverts, Internet Digital, Internet Physique, Développement durable.

Interconnection of logistics networks: elements of definition and potential

ABSTRACT : Logistics networks intensely use transportation means and storage facilities to respond to supply chain's demands. However, these networks are overwhelmingly dedicated to an actor and are therefore poorly interconnected. This fragmentation explains the lack of consolidation and thus efficiency. To cope with the seeming antagonism between atomized freight and the objective of the European Commission to drastically reduce CO₂ emissions, a major improvement in supply networks is sought. We propose then to interconnect logistics networks like the Digital Internet did with computer networks. The first objective of this thesis is to contribute to the definition of the first key elements of logistics networks interconnection. To this purpose, we explore the possible transpositions between computer networks, in particular Internet, and logistic networks. In fact, there are strong similarities between these networks in spite of the basic differences in the type of objects. Beyond Physical Internet concepts and proposed methods, no demonstration of the potential of interconnected logistics networks has been carried out. This is precisely the second objective of this work to assess the associated stakes. To reach this goal, we use a set of actual flows from the Fast Moving Consumer Goods sector (FMCG) in France. Various transportation protocols and scenarios are tested, revealing encouraging with gains in CO₂ emissions, cost, and so forth. As this is a first work in the field of interconnected logistics networks, the simulation model suggests many further research avenues.

Keywords : Transportation protocols, Interconnection, Open logistics networks, Physical Internet, Digital Internet, Sustainable development.

